



**Caracterização do regime de inundações na bacia hidrográfica
da ribeira de Barcarena em cenários de alterações climáticas e
sua interação com a subida do nível médio do mar**

Marta Isabel Jorge da Fonseca

Mestrado em Ecologia e Gestão Ambiental

Dissertação orientada por:
Doutor João Pedro Carvalho Nunes
Professor Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Aos meus pais e irmão,
que nem sempre compreendendo, apoiaram o meu caminho.

Aos meus avós,
que mesmo já não estando, levo nesta viagem.

Agradecimentos

A todos os que tornaram possível esta minha introdução ao mundo da modelação, um processo de (re)aprendizagem, resiliência e crescimento, deixo aqui o meu sincero agradecimento.

Ao João Pedro Nunes e Professor Ramiro Neves, orientadores desta dissertação, pela oportunidade, disponibilidade, partilha de conhecimentos e confiança depositada.

Ao Professor Rui Taborda e Luís Dias, pela troca de ideias e sugestão do tema. Ao Luís, também pelo apoio, incentivo, ensinamentos e por disponibilizar informação e/ou meios essenciais à concretização deste trabalho.

À (restante) equipa CCIAM que de uma forma ou de outra me ajudaram a concretizar este trabalho, também pela recetividade, encorajamento, troca de ideias/opiniões, oportunidades e momentos partilhados. [Sois muitos, mas sabeis quem sois.]

À equipa MARETEC (particularmente à Ana Oliveira, Lucian Simionesei, Tiago Ramos e Jorge Palma), por terem sempre as portas abertas para me receber, também pelo auxílio, partilha de conhecimentos e por disponibilizarem informação essencial à realização deste estudo.

Ao Frank Braunschweig, pela disponibilidade, esclarecimentos e ajuda prestada.

Aos docentes e aos colegas de EGA, por todas as lições, ensinamentos, experiências, inspiração e incentivo ao crescimento intelectual e pessoal.

À Ganna, Carina e Vera, sem ordem em particular, pelo altruísmo, bondade e apoio sempre presentes. Com Lisboa, vocês (e outras “coisas” mais) e com vocês, a convicção de que a vida, por mais voltas que dê, encontra (sempre) o seu lugar.

Por fim, mas não por último, à minha família e amigos, por me inculirem a necessidade de conhecer, entender, lutar ou simplesmente usufruir, mesmo sem o perceberem.

Por isto e por tudo o que ainda não disse, bem hajam.

Resumo

A ocorrência de cheias e inundações constitui uma problemática de cariz global associada a inúmeras e nefastas repercussões na sociedade.

À semelhança de outros rios portugueses, a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena apresenta um histórico apreciável de eventos desta natureza. Contudo, ressalta-se o interesse de investigação da zona em estudo em prol da ocupação humana e atividades localizadas em áreas de potencial suscetibilidade, bem como a projeção de modificações no padrão de precipitação e forçamento oceanográfico, representativos de um incremento na probabilidade e magnitude do risco de inundação, em contexto de alterações climáticas.

Neste sentido, a presente dissertação reflete o esforço de modelação voltado para a caracterização do regime de inundações, com quantificação da contribuição dos processos promotores de inundação referidos.

Mediante modelação hidrológica e hidráulica, com aplicação do *MOHID Land*, foi também possível elaborar uma cartografia de áreas inundáveis, com as respetivas projeções em termos de profundidade máxima de inundação, velocidade do escoamento e perigosidade associada, tendo subjacente diferentes períodos de retorno (20, 50 e 100 anos), cenários de alterações climáticas (presente e futuro de médio e longo prazo) e situações de forçamento oceanográfico (normal e tempestade no mar).

Concluiu-se que, atualmente, as zonas suscetíveis de representar perturbações ou perigo para a população incidem, na sua maioria, em áreas do tecido urbano com declividade relevante e áreas contíguas ao curso de água, onde a baixa declividade proporciona uma área de inundação considerável.

Da análise de cenários de alterações climáticas, verifica-se um incremento generalizado e progressivo do perímetro inundável e perigosidade associada desde o presente até ao cenário de longo prazo (2071-2100). Estes impactos fazem-se sentir de forma mais agravada em fenómenos extremos de precipitação (período de retorno de 100 anos), em detrimento do aumento acentuado da profundidade máxima da coluna de água e/ou da velocidade do escoamento.

Ainda que os maiores contributos nas cheias e inundações estejam articulados às precipitações, constata-se que os efeitos do forçamento oceanográfico se fazem sentir de forma gradual para valores de nível do mar superiores a 2,22 m (dentro da gama de valores testados). Constata-se ainda que embora os efeitos sejam pouco significativos, estes incidem nos terrenos contíguos à linha de água, caracterizados essencialmente por zonas de interesse cultural e paisagístico.

A análise de resultados mostra um impacto pouco expressivo das alterações climáticas (tanto da precipitação como do nível do mar) na área vulnerável a cheias e inundações (exceção para períodos de retorno de 100 anos), sendo que o principal resultado é um impacto na perigosidade máxima.

Palavras-Chave:

Cheias e inundações; Alterações climáticas; Precipitações extremas; Forçamento oceanográfico; MOHID Land.

Abstract

Floods occurrence is a global issue associated with numerous and harmful repercussions on society.

The watershed of Ribeira da Barcarena, as other Portuguese rivers, has a history of multiple events of this nature.

Projected changes in precipitation and oceanographic forcing patterns, with increases in probability and magnitude of flood risk in climate change context, highlight the research interest of this region, identified with human occupation and activities located in areas of potential susceptibility.

This dissertation intends to characterize the floods regime by modeling and quantifying the flood-inducing processes contribution.

Hydrological and hydraulic modeling with MOHID Land was also used to create a cartography of floodable areas with projections in terms of the maximum water column, flow velocity and associated hazard, for different return periods (20, 50 and 100 years), climate change scenarios (present and medium and long-term future) and oceanographic forcing situations (normal and sea storm).

It is concluded that currently the susceptible areas to represent disruption or danger to the population are mostly located in urban fabric areas with relevant slope and areas contiguous to the watercourse where the low slope provides a considerable flooding area.

Analysis of climate change scenarios showed a generalized and progressive increase in the floodable perimeter and associated hazard from the present to the long-term scenario (2071-2100). These impacts are more distinct in extreme precipitation phenomena (100-year return period), to the detriment of the sharp increase in the maximum water column and/or flow velocity.

Although the major contributions to floods are linked to precipitations, it appears that the effects of oceanographic forcing are gradually felt for sea levels values greater than 2,22 m (within the range of tested values). It is also noted that although the effects are not very significant, they affect the land adjacent to the water line, characterized essentially by areas of cultural and scenic interest.

The results analysis shows a reduced impact of climate change (both precipitation and sea level) in the area vulnerable to floods (except for 100-year return periods), being the impact of maximum hazard the main result.

Keywords:

Floods; Climate change; Extreme precipitations; Oceanographic forcing; MOHID Land.

Índice

INTRODUÇÃO	1
1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO	1
2. OBJETIVOS DA TESE	2
3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
CAPÍTULO I - ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
1. VISÃO GERAL DO PROBLEMA: INUNDAÇÕES E CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS – EVIDÊNCIAS DE IMPACTES FUTUROS	5
1.1. CHEIAS E INUNDAÇÕES – UMA PROBLEMÁTICA DE CARIZ GLOBAL	5
1.2. CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS – PROJEÇÕES E SUAS IMPLICAÇÕES NAS CHEIAS E INUNDAÇÕES	6
1.2.1. Fundamentos básicos das alterações climáticas e suas evidências	7
1.2.2. Cenários de alterações climáticas: projeções globais, regionais e/ou locais	8
2. MODELAÇÃO DE CHEIAS E INUNDAÇÕES RÁPIDAS	11
2.1. ABORDAGEM DA MODELAÇÃO	11
2.2. MOHID LAND: DESCRIÇÃO DO MODELO E APROXIMAÇÕES TEÓRICAS	13
2.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MODELO	16
2.3.1. Indicadores estatísticos	17
CAPÍTULO II - MATERIAIS E MÉTODOS	19
1. ASPETOS METODOLÓGICOS E OUTRAS CONSIDERAÇÕES	19
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
3. IMPLEMENTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	24
3.1. MODELO 2D	24
3.1.1. Considerações gerais	24
3.1.2. Inputs do modelo – situação de referência	25
3.1.3. Parametrização do modelo	31
3.2. MODELO 3D	33
3.2.1. Considerações gerais	33
3.2.2. Inputs e outros parâmetros do modelo	34
4. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA	39
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	39
4.2. INPUTS DO MODELO	40
4.2.1. Elementos físicos	40
4.2.2. Condições de fronteira – situação atual	41
4.2.3. Condições de fronteira – situação futura	43
5. MODELAÇÃO HIDRÁULICA	44
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	44
5.2. INPUTS DO MODELO	45
5.2.1. Modelo digital de terreno	45

5.2.2. Curve Number	46
5.2.3. Coeficiente de rugosidade de Manning	47
5.2.4. Condições de fronteira – situação atual e futura	48
6. ATRIBUTOS DA ANÁLISE DE RESULTADOS – CENÁRIOS E OUTRAS CONSIDERAÇÕES	49

CAPÍTULO III - RESULTADOS E DISCUSSÃO **51**

1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO: AVALIAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO	51
2. CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE INUNDAÇÕES NA ZONA CRÍTICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE BARCARENA	56
2.1. CONTRIBUTO DAS PRECIPITAÇÕES EXTREMAS E/OU DO FORÇAMENTO OCEANOGRÁFICO NAS CHEIAS E INUNDAÇÕES	56
2.1.1. Análise da profundidade máxima de inundação na área de observação	56
2.1.2. Análise do nível de perigosidade da inundação na área de observação	58
2.1.3. Peso da precipitação no nível máximo e perigosidade máxima da inundação	60
2.1.4. Peso do forçamento oceanográfico nas cheias e inundações	61
2.2. VULNERABILIDADE A CHEIAS E INUNDAÇÕES – SITUAÇÃO ATUAL E FUTURA	65
2.3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE ALTURA DE ÁGUA E PERIGOSIDADE	72

CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES **76**

1. RESPOSTAS ÀS PERGUNTAS DE INVESTIGAÇÃO	76
2. LIMITES E CRÍTICAS AO ESTUDO	77
3. INVESTIGAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **80**

ANEXOS **86**

ANEXO 1 – CURVAS DE VAZÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA SENHORA DA ROCHA (21B/04H)	87
ANEXO 2 – GROWTH_DATABASE (FICHEIRO .DAT)	88
ANEXO 3 – CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA OBTIDOS NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA	93
ANEXO 4 – ÁREAS DE OBSERVAÇÃO	100
ANEXO 5 – RESPOSTA DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NA DISTRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE INUNDAÇÃO	113
ANEXO 6 – CARTOGRAFIA DE ÁREAS INUNDÁVEIS NA ZONA EM ESTUDO	114

Índice de figuras

Figura I.1 – Número de desastres naturais com prejuízos considerados relevantes, no período histórico de 1980 a 2017. Por ordem decrescente de ocorrências: linha azul representa os eventos associados a desastres de origem hidrológica, que inclui inundações e movimento de massas; linha verde representa os de origem meteorológica, que inclui tempestades tropical, extratropical, convectiva e local; linha laranja representa os de origem climática, que inclui temperaturas extremas, seca e incêndios; linha vermelha representa os de origem geofísica, que inclui terremotos, tsunamis e atividade vulcânica. (Fonte: Munich Re, 2018)	6
Figura I.2 – Observações das alterações climáticas: a) Anomalias da temperatura média global da superfície. Para a elaboração deste gráfico foram calculadas as médias das anomalias das temperaturas superficiais terrestres e oceânicas globais, para cada ano, tendo como referência a média durante o período de 1986 a 2005. As diferentes cores referem-se a dados com diferentes origens. b) Concentrações médias globais de dióxido de carbono (CO ₂ , a verde), de metano (CH ₄ , a cor de laranja) e de óxido nitroso (N ₂ O, a vermelho), determinadas a partir de análises a testemunhos de gelo (pontos) e de medições atmosféricas diretas (linhas). ppm e ppb refere-se a partes por milhão e partes por mil milhões, respetivamente. (Fonte: adaptado de IPCC, 2014)	7
Figura I.3 – Variação do NMGM em relação ao período de 1986 a 2005. As cores indicam diferentes conjuntos de dados, sendo que estão alinhados para ter o mesmo valor em 1993, o primeiro ano de dados de altimetria de satélite (linha vermelha). Onde avaliadas, as incertezas são indicadas por sombreamento colorido. (Fonte: adaptado de IPCC, 2014).....	8
Figura I.4 – Projeções das alterações climáticas para os cenários RCP2.6 (azul) e RCP8.5 (vermelho): Alteração da temperatura média global da superfície (a) e subida do NMGM (b), entre 2006 a 2100, em relação a 1986–2005. As médias (linha) e incertezas médias associadas (sombreado), entre 2081 a 2100, estão representadas sob a forma de barras verticais coloridas no lado direito de cada painel, considerando todos os cenários RCP's. É também apresentado o número de modelos Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) utilizados para determinar essas médias. (Fonte: Adaptado de IPCC, 2014)10	
Figura I.5 – Medições do NMLM obtidas com o marégrafo de Cascais (séries médias mensais). (Fonte: PSMSL e IGP/DGT; Antunes, 2016; Rocha, 2016).....	11
Figura II.1 – Síntese metodológica relativa à elaboração de uma cartografia de cheias e inundações rápidas. (Fonte: Morais et al., 2019)	19
Figura II.2 – Abordagem integrada dos processos de modelação de cheias e inundações rápidas. (Fonte: Morais et al., 2019).....	20
Figura II.3 – Enquadramento geográfico das BHRB e BHRJ e localização de algumas das estações hidrométricas (azul) e meteorológicas (rosa) mais próximas. As linhas cinzentas representam os limites dos concelhos da região onde se inserem.	21
Figura II.4 – Carta de solos existentes na região em estudo, com delimitação das bacias hidrográficas e identificação de algumas das estações meteorológicas (rosa) e hidrométricas (azul) existentes.	23
Figura II.5 – Relação entre a área drenada e a largura máxima do canal, para cada número de Strahler. Valores de referência do modelo.....	27
Figura II.6 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica do Rio Jamor.....	27
Figura II.7 – Mapa de valores de Curve Number para a bacia hidrográfica do rio Jamor.	28
Figura II.8 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia horográfica do rio Jamor. 29	

Figura II.9 – Nível hidrométrico instantâneo registado na estação hidrométrica da Senhora da Rocha (azul) no ano hidrológico de 2010 e representação da altura hidrométrica para a qual se anula o caudal (laranja) e altura hidrométrica máxima de aplicação da curva de vazão do SNIRH (vermelho).	30
Figura II.10 – Curva de vazão resultante do ajustamento da regressão de potência à relação entre a altura de água e o caudal calculado a partir da equação de Manning-Strickler. Troço 1 da curva de vazão está representado a verde, enquanto que o troço 2 está representado a azul.	30
Figura II.11 – Comparação entre o caudal determinado segundo a curva de vazão disponibilizada pelo SNIRH para o ano hidrológico de 2010 (vermelho) e a curva de vazão de Manning-Strickler (laranja).	31
Figura II.12 – Precipitação (azul) utilizada na fase de calibração (rosa tracejado) e validação do modelo (roxo tracejado) com os respetivos caudais observados (verde).	31
Figura II.13 – Relação entre a área drenada e a largura máxima calibrada do canal, para cada número de Strahler. Valores de modelo calibrado.	33
Figura II.14 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica do Rio Jamor.	34
Figura II.15 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia horográfica do rio Jamor.	35
Figura II.16 – Características dos layers e horizontes que definem a discretização vertical do modelo (Fonte: adaptado de MARETEC, 2019).	35
Figura II.17 – Identificação e distribuição espacial dos ID's integrantes de cada camada/horizonte definido.	36
Figura II.18 – Mapa do tipo de vegetação caracterizado na bacia horográfica do rio Jamor.	38
Figura II.19 – Mapa de valores de coeficiente de cultura para a bacia horográfica do rio Jamor.	38
Figura II.20 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	40
Figura II.21 – Mapa de valores de Curve Number (esquerda) e de coeficiente de rugosidade de Manning do solo (direita) para a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	41
Figura II.22 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados com base em dados observados para a estação meteorológica do Cacém entre os anos hidrológicos de 1979 a 2007. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019)	42
Figura II.23 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados para os períodos de médio prazo (2041-2070), para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019)	43
Figura II.24 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados para os períodos de longo prazo (2071-2100), para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019)	43
Figura II.25 – Modelo digital do terreno correspondente à zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	46
Figura II.26 – Mapa de valores de Curve Number correspondente à parte jusante da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	47
Figura II.27 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning correspondente à parte jusante da bacia horográfica da ribeira de Barcarena.	47

Figura II.28 – Ligação entre o modelo hidrológico (acima) e hidráulico (abaixo), com identificação do nó onde foi considerado o afluente do modelo hidrológico no modelo hidráulico (indicador azul da caixa laranja).....	48
Figura III.1 – Comparação entre os caudais simulados (laranja) e observados (verde), com representação da precipitação observada (azul) nos três períodos simulados, considerando as configurações de modelo calibrado. Em tabelas constam os resultados da análise estatística (eventos para calibração do modelo à esquerda e centro e para validação à direita), estando a sombreado de cor verde os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.....	51
Figura III.2 – Comparação entre os caudais simulados (laranja) e observados (verde), nos primeiros três meses do ano hidrológico de 2010 (em cima) e nos três eventos de precipitação investigados na presente dissertação (em baixo), considerando as configurações de modelo 3D calibrado. Em tabelas constam os resultados da análise estatística, estando a sombreado de cor verde os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.	53
Figura III.3 – Comparação entre as precipitações registadas nas Estações Meteorológicas de Caneças (linha azul) e Barcarena (linha vermelha), nos eventos considerados para calibração (29 e 30 de outubro de 2010) e validação do modelo (5 e 6 de dezembro de 2010).	55
Figura III.4 – Comparação entre as precipitações registadas nas estações meteorológicas de Caneças (linha azul) e a precipitação Caneças transformada (linha vermelha), nos eventos considerados para calibração (29 e 30 de outubro de 2010) e validação do modelo (5 e 6 de dezembro de 2010).....	55
Figura III.5 – Distribuição do número de células, por classe de valores de profundidade máxima de inundação, obtidos na situação presente (colunas da esquerda), e futura de médio prazo (colunas do centro) e longo prazo (colunas da direita). A azul claro estão as células com alturas de água inferiores e iguais a 1,0 m, a azul, as células com alturas entre 1,0 e 2,0 m e a azul escuro, as células com alturas iguais ou superiores a 2,0 m.	57
Figura III.6 – Distribuição do número de células, por classe de valores de perigosidade, obtidos na situação presente (colunas da esquerda), e futura de médio prazo (colunas do centro) e longo prazo (colunas da direita). A amarelo estão as células com perigosidade Inexistente e Baixa, a laranja, as células com perigosidade Média e a vermelho, as células com perigosidades Alta e Muito Alta.	58
Figura III.7 – Contributo das precipitações no nível máximo da inundação. A imagem ilustra os resultados associados aos diferentes períodos de retorno, para a situação presente (azul), médio prazo (laranja) e longo prazo (verde), obtidos na modelação hidráulica sem imposição do NM como condição de fronteira a jusante.	61
Figura III.8 – Contributo das precipitações na perigosidade máxima da inundação. A imagem ilustra os resultados associados aos diferentes períodos de retorno, para a situação presente (azul), médio prazo (laranja) e longo prazo (verde), com representação dos limites superiores das classes de nível de perigosidade Inexistente (linha tracejada de cor amarelo), Baixa (linha tracejada de cor laranja claro) e Média (linha tracejada de cor laranja escuro).....	61
Figura III.9 – Resposta da variação do nível do mar no nível máximo da inundação, com representação da condição normal de forçamento oceanográfico (linha a vermelho) e de tempestade (linha a vermelho escuro). A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).	62
Figura III.10 – Contributo do forçamento oceanográfico no nível máximo da inundação, em percentagem. A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).	63

Figura III.11 – Resposta da variação do nível do mar na perigosidade máxima da inundação, com representação da condição normal de forçamento oceanográfico (linha a vermelho) e de tempestade (linha a vermelho escuro). A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).	64
Figura III.12 – Contributo do forçamento oceanográfico na perigosidade máxima da inundação, em percentagem. A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).	65
Figura III.13 – Profundidade máxima de inundação associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.	66
Figura III.14 – Perigosidade associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.	68
Figura III.15 – Velocidade do escoamento associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.	69
Figura III.16 – Profundidade máxima de inundação associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.	70
Figura III.17 – Perigosidade associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (2071-2100, baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.	71
Figura III.18 – Velocidade do escoamento associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.	72
Figura III.19 – Pormenor da zona montante (vermelho) e jusante (azul ciano) da ponte da estrada Cartuxa e da ponte da Estrada Gibalta (amarelo).	75

Índice de tabelas

Tabela I.1 – Descrição dos quatro cenários RCP apresentados no quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2014).	8
Tabela II.1 – Caracterização geométrica das bacias hidrográficas da ribeira de Barcarena e do rio Jamor. (Fonte: adaptado de Câmara Municipal de Oeiras, 2011b, 2011a).	22
Tabela II.2 – Características principais do modelo calibrado e validado na bacia hidrográfica do rio Jamor.	25
Tabela II.3 – Características morfológicas da rede de drenagem do modelo de referência.	26
Tabela II.4 – Coeficientes de Manning adotados em função do uso e ocupação do solo.	29
Tabela II.5 – Valores iniciais e calibrados dos parâmetros utilizados no modelo.	32
Tabela II.6 – Características principais do modelo calibrado e validado na bacia hidrográfica do rio Jamor.	33
Tabela II.7 – Parâmetros de van Genuchten do solo considerados no modelo hidrológico 3D calibrado, para cada horizonte definido e ID identificado.	36
Tabela II.8 – Tipos de vegetação e respetivo valor de coeficiente de cultura.	37
Tabela II.9 – Valores de sucção de Feddes para cada tipo de vegetação.	38
Tabela II.10 – Características do modelo hidrológico aplicado na bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	39
Tabela II.11 – Características morfológicas da rede de drenagem do modelo hidrológico.	40
Tabela II.12 – Períodos de retorno da amostra de precipitação diária máxima anual da Estação Meteorológica do Cacém, considerando diferentes leis de extremos. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019).	41
Tabela II.13 – Períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, associados à precipitação máxima diária anual da estação meteorológica do Cacém para o histórico observado (1979-2007) e valores projetados a médio (2041-2070) e longo prazo (2071-2100), obtidos através da mediana de nove modelos climáticos, para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019).	44
Tabela II.14 – Características principais do modelo hidráulico aplicado na zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	45
Tabela II.15 – Definição das condições de fronteira de jusante utilizadas nos processos de modelação da zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.	49
Tabela II.16 – Perigosidade hidrodinâmica da inundação. (Fonte: Adaptado de APA et al., 2014).....	50
Tabela III.1 – Análise comparativa do desempenho dos modelos hidrológicos 2D e 3D, tendo por base os diferentes indicadores estatísticos considerados. A sombreado de cor verde estão os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.	53
Tabela III.2 – Resposta da variação do nível do mar na distribuição da perigosidade da inundação: Variação percentual do número de células relativas a cada classe de valores. A sombreado vermelho estão as classes onde se registou uma diminuição no número de pixéis e a sombreado verde, as classes onde se verificou um aumento no número de pixéis.	59
Tabela III.3 – Identificação do registo máximo de nível de inundação associado ao cenário presente e futuro de médio e longo prazo, para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, considerando as diferentes situações de forçamento oceanográfico analisadas.	73

Tabela III.4 – Identificação do registo máximo de perigosidade associado ao cenário presente e futuro de médio e longo prazo, para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, considerando as diferentes situações de forçamento oceanográfico analisadas. 74

Tabela A.1 – Resposta da variação do nível do mar na distribuição da profundidade máxima de inundação: Variação percentual do número de células relativas a cada classe de valores. A sombreado vermelho estão as classes onde se registou uma diminuição no número de pixéis e a sombreado verde, as classes onde se verificou um aumento no número de pixéis..... 113

Lista de acrónimos e símbolos

A – Área da secção transversal da coluna de água

a e b – Parâmetros da curva de vazão

AMC – *Antecedent Moisture Condition*

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

BHRB – Bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena

BHRJ – Bacia hidrográfica do rio Jamor

CD – Opção de condição de fronteira “*Critical Depth*” imposta no modelo

CH₄ – Metano

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CN – *Curve Number*

CN (I) – *Curve Number* para a situação de solo seco (AMC I)

CN (II) – *Curve Number* para a situação normal de humidade do solo (AMC II)

CNGRI – Comissão Nacional da Gestão de Riscos de Inundação

CO₂ – Dióxido de carbono

DGT – Direcção-Geral do Território

E_p – Evaporação potencial do solo

ET_c – Evapotranspiração cultural

ET_o – Evapotranspiração de referência

g – Aceleração da gravidade

GEE – Gases com efeito de estufa

GtCO₂-eq/ano – Gigatoneladas de CO₂ equivalente por ano

H – Potencial matricial calculada no centro de cada célula

h – Pressão efetiva

h₀ – Altura hidrométrica para a qual se anula o caudal

H_a – Altura da coluna de água

HC – Profundidade máxima da coluna de água

HC_{max} – Nível máximo de inundação ou área de maior profundidade de inundação

H_i – Altura hidrométrica instantânea

H_{max} – Altura hidrométrica máxima de aplicação da curva/troço

H_{min} – Altura hidrométrica mínima de aplicação da curva/troço

IDF – Curvas de intensidade-duração-frequência

IGIDL – Instituto Geofísico Infante Dom Luís

IGP – Instituto Geográfico Português

i_m – Diferença de cotas entre a extremidade a montante, Z_{max} , e a jusante, Z_{min} , do curso de água principal sobre o seu comprimento em metros, L_{bm}

INAG – Instituto da Água

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

IST – Instituto Superior Técnico

k – Condutividade hidráulica

K_c – Coeficiente de cultura

k_h – Fator de condutividade hidráulica horizontal

k_s – Condutividade hidráulica saturada

L – Parâmetro empírico que descreve a conectividade/tortuosidade dos poros

LAI – Índice de área foliar

L_{bk} – Comprimento do curso de água principal da bacia

MARETEC – *Marine, Environment & Technology Center*

MDT – Modelo digital de terreno

n – Número da amostra

N_2O – Óxido nitroso

N_M – Coeficiente de Manning

NM – Nível do mar

NMGM – Nível médio global do mar

NMLM – Nível médio local do mar

NMM – Nível médio do mar

NMM1938 – Nível médio do mar de Cascais de 1938, zero altimétrico de Portugal Continental

NM_{max} – Valor extremo associado ao período de retorno de 50 anos alcançado pelo nível do mar

NSE – Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe

O – Valores observados

P – Perigosidade da inundação

PMAACO – Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas de Oeiras

PBIAS – Percentagem de enviesamento entre simulações e observações

PDMA – Precipitação diária máxima anual

PGRI – Plano de Gestão de Risco de Inundações

PIAAC-AMAL – Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas da Comunidade Intermunicipal do Algarve

P_{max} – Nível máximo de perigosidade da inundação

ppb – Partes por mil milhões

ppm – Partes por milhão

ppmv – Partes por milhão em volume

PSMSL – Permanent Service for Mean Sea Level

PT-TM06/ETRS89 – *European Terrestrial Reference System 1989*

Q – Caudal na face da célula ao longo das duas direções horizontais da malha x e y

R^2 – Coeficiente de determinação

RCP – *Representative Concentration Pathways*

R_h – Raio hidráulico

RMSE – Razão entre a raiz do erro quadrático médio

RSR – Razão RMSE-desvio padrão das observações

S – Valores simulados

SCS – *Soil Conservation Service*

S_e – Teor de água efetivo

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SRES – *Special Report on Emissions Scenarios*

t_c – Tempo de concentração da bacia

TIN - *Triangulated Irregular Network*

T_p – Transpiração potencial das culturas

v – Velocidade do escoamento nas direções x e y

V_e – Velocidade do escoamento associada à coluna de profundidade máxima de inundação

v_i – Velocidade da água na interface da célula ao longo da direção i

x e y – Distância ao longo das duas direções horizontais da malha

x_i – Distância ao longo da direção i

α e η – Parâmetros de ajustamento empírico

θ – Teor de água na célula

θ_r – Teor de água residual

θ_s – Teor de água na saturação

1. Contextualização da investigação

Há muito tempo que as cheias e inundações constituem um desastre natural de amplo interesse na sociedade, face à capacidade morfogenética e outros impactos danosos a si associados (Leal, 2011; Most & Marchand, 2017; Papaioannou et al., 2016; Verwey et al., 2017).

Nos últimos anos, as circunstâncias climáticas provocaram fenómenos hidrológicos extremos de frequência crescente, justificando a necessidade de uma abordagem integrada e sustentável para a gestão do risco de cheias e inundações, como forma de minimizar os possíveis danos no futuro (Buta et al., 2018; Munich Re, 2018, 2017; Santos, 2015).

Não obstante, para além do clima, também as características hidrológicas e hidráulicas e as condições socioeconómicas da região podem influenciar a natureza e os efeitos das inundações numa dada bacia hidrográfica ou planície costeira (Most & Marchand, 2017).

Neste contexto, em 2007, a União Europeia assumiu um novo quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações para todos os seus Estados-Membros, quadro esse definido na Diretiva 2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro, e transposto para o direito interno pelo Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de outubro (Santos, 2015).

A Diretiva Comunitária 2007/60/CE¹ estabelece que: *“A fim de dispor de um instrumento de informação eficaz, bem como de uma base valiosa para estabelecer prioridades e para tomar decisões técnicas, financeiras e políticas ulteriores em matéria de gestão de riscos de inundações, é necessário prever a elaboração de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundações indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações, incluindo informações sobre fontes potenciais de poluição ambiental resultante das inundações. Neste contexto, os Estados-Membros deverão avaliar as actividades que provocam o aumento dos riscos de inundações”*.

Tendo isto em vista, e de forma a contrariar o expectável agravamento do risco de cheias e inundações inerente aos cenários de alterações climáticas, foram recentemente estabelecidas, em Portugal, estratégias de adaptação, de modo a que o planeamento municipal possa implementar medidas de mitigação². São exemplos o Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas da Comunidade Intermunicipal do Algarve (PIAAC-AMAL)³ e o Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas de Oeiras (PMAACO) – ambos desenvolvidos em contexto multisectorial.

No PMAACO (Dias et al., 2019; Morais et al., 2019), a avaliação das vulnerabilidades a cheias e inundações em cenários de alterações climáticas do município centrou-se na modelação hidrológica e hidráulica do rio Jamor, cuja informação de perigosidade obtida proporcionou uma extrapolação da perigosidade para as restantes linhas de água do município, tendo por base os resultados do “Estudo

¹ Documento disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32007L0060> (consultado em 10/08/2019).

² Para a materialização dos objetivos preconizados na Diretiva e no Decreto-Lei mencionados, concretizaram-se várias etapas, dos quais se enquadram os Planos de Gestão dos Riscos de Inundações (PGRI), que integram, nesta segunda fase de elaboração, os efeitos das alterações climáticas (APA, 2020).

³ Plano disponível em <http://amal.pt/comunicacao/publicacoes> (consultado em 22/07/2019).

Hidrológico e Hidráulico das bacias Hidrográficas de Oeiras para elaboração de carta de zonas inundáveis de acordo com Decreto-Lei n.º 115/2010”.

Apesar de nos últimos anos terem sido implementadas medidas estruturais de regularização fluvial na ribeira de Barcarena⁴ (bacia em estudo no presente projeto), devidas não só ao historial de cheias e inundações, mas fundamentalmente à proximidade da rede viária e elevada densidade urbana nas zonas adjacentes ao curso de água (Câmara Municipal de Sintra, 2014), esta não tem ainda publicada uma cartografia de áreas inundáveis em cenários futuros de alterações climáticas.

A título de exemplo, foram registadas, nesta bacia, cheias e inundações em 1967 e 1983 (Câmara Municipal de Sintra, 2014; Xia et al., 2011) e, mais recentemente, 2008, 2011 e 2012 (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.), dando particular destaque para o primeiro destes eventos, cujas consequências materiais e humanas foram relevantes (Leal, 2011).

De notar que, geograficamente, a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena (BHRB) abrange parte dos concelhos de Sintra e Oeiras (desenvolvendo-se desde a Serra da Carregueira até ao Estuário do rio Tejo, na localidade de Caxias) e encontra-se delimitada a Este pela bacia hidrográfica do rio Jamor (BHRJ) e a Oeste pelas bacias da ribeira de Porto Salvo e da Laje (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Câmara Municipal de Sintra, 2014).

Portanto, esta dissertação irá contribuir para uma mais ampla implementação da Diretiva 2007/60/CE, constituindo um complemento ao disposto no PMAACO (Dias et al., 2019; Morais et al., 2019), especificamente no que concerne às cheias e inundações rápidas.

Em linha com o PMAACO (Dias et al., 2019; Morais et al., 2019), esta dissertação consiste essencialmente na modelação do potencial de cheias e inundações da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, com enfoque na zona da bacia localizada a jusante da Estação Hidrométrica de Laveiras⁵ (foz da ribeira de Barcarena, doravante referenciada como “zona crítica”⁶ ou “zona em estudo”), considerando o efeito conjunto das precipitações extremas e do forçamento oceanográfico.

A modelação realizou-se com base no modelo *MOHID Land*, que é um modelo numérico integrado no software *MOHID Studio*, que permite simular todos os processos hidrológicos e hidráulicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, incluindo precipitação pluviométrica, infiltração, escoamento superficial, escoamento em canais que constituem a rede de drenagem e fluxos de água subterrânea (Action Modulers, 2016; APA et al., 2014; MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

2. Objetivos da tese

A caracterização do regime de inundação na bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, com delimitação espacial das áreas inundáveis, para vários cenários de ocorrência, períodos de retorno associados e situações de forçamento oceanográfico, constitui o objetivo principal da presente dissertação.

Nesse sentido, foi necessária a compreensão dos processos relativos ao funcionamento do *MOHID Land* (conceitos e formulações principais, configurações dos diferentes módulos, definição de opções do utilizador, entre outros), de forma a desenvolver-se um modelo que permita a realização da modelação dos processos promotores de cheias e inundações na área de estudo.

⁴ Também conhecida por ribeira das Jardas e/ou dos Ossos.

⁵ Estação 21B/03H, de acordo com o disposto em <https://snirh.apambiente.pt/> (consultado em 24/09/2018).

⁶ Saliente-se que esta definição nada tem a ver com os PGRI's, que definem zona crítica como sendo áreas de risco potencial significativo de inundação.

Ao longo desta tese de mestrado procurou-se responder a alguns objetivos específicos, nomeadamente o que respeita à:

- Vulnerabilidade da zona crítica a cheias e inundações;
- Projeção das modificações do regime de inundação em cenários futuros de alterações climáticas;
- Avaliação do potencial de inundação causada pelos efeitos conjuntos das precipitações extremas e do forçamento oceanográfico;
- Apreciação e/ou análise de áreas de inundação, em termos de profundidade máxima de inundação e perigosidade associada;
- Determinação e/ou quantificação da contribuição dos dois processos promotores referidos no regime de inundação.

3. Estrutura e organização da tese

A organização da dissertação reflete o procedimento adotado no sentido da concretização dos objetivos enunciados. Desta forma, o presente estudo é constituído por 4 Capítulos, seguidamente discriminados, sendo que esta Introdução sublinha o contexto da dissertação, apresenta o âmbito e os objetivos da investigação e explica a estrutura do documento.

Capítulo I – Enquadramento teórico:

Neste capítulo procede-se à revisão de conhecimentos mais relevantes existentes na literatura sobre os temas centrais da investigação, organizados em dois subcapítulos. O primeiro, direcionado para a problemática das cheias e inundações e das alterações climáticas, onde se inventariam os principais efeitos registados nos últimos anos e se sintetizam as projeções climáticas futuras e respetivas implicações, à escala global e regional. O segundo, orientado para a modelação destes fenómenos extremos, onde se descrevem a abordagem e os processos inerentes a este método, se evidenciam as características primárias e formulações governativas intrínsecas ao *MOHID Land*, e se expõe a importância e o modo de avaliar o desempenho de um modelo, mediante apresentação dos indicadores estatísticos mais utilizados no contexto de modelação de processos hidrológicos.

Capítulo II – Materiais e métodos:

Neste capítulo descrevem-se os materiais e métodos necessários à concretização dos objetivos estipulados, dispostos em 6 subcapítulos. O primeiro, onde se apresenta uma visão geral da metodologia aplicada e se abordam algumas especificidades relacionadas com os processos de modelação. O segundo, focado na caracterização da área de estudo, quer a nível do seu enquadramento geográfico, como do ponto de vista geométrico e geológico. Os três subcapítulos seguintes que detalham os processos e métodos adotados em cada um dos modelos desenvolvidos no âmbito deste trabalho. Sendo, no terceiro subcapítulo, abordadas questões relacionadas com a implementação, calibração e validação do modelo (2D e 3D), nomeadamente o que respeita às suas características principais, procedimentos e critérios de parametrização; no quarto subcapítulo, estabelecidos os intuítos, características e/ou outros aspetos relevantes concernentes ao modelo hidrológico; e no quinto subcapítulo, sintetizadas as características e particularidades associadas ao modelo hidráulico, com menção dos objetos sequentes previstos na modelação de processos promotores de cheias e inundações. Por fim, o sexto subcapítulo, onde se tecem algumas considerações relevantes sobre a análise de resultados efetuada.

Capítulo III – Resultados e discussão:

Neste capítulo discutem-se os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação, estruturados em 2 subcapítulos. No primeiro, apresentam-se os conteúdos referentes à calibração/validação e avaliação do desempenho do modelo 2D, complementado por uma análise construtiva e crítica ao mesmo e uma análise comparativa dos resultados obtidos, com os do modelo hidrológico 3D que considera a mesma área de estudo. O segundo, focado na caracterização do regime de inundações simuladas, onde se fazem algumas apreciações relativas ao contributo das precipitações extremas e/ou do forçamento oceanográfico no regime de inundações (nos diferentes períodos de retorno, cenários de ocorrência e situações de forçamento oceanográfico considerados), quer em termos de profundidade máxima de inundação como de nível da perigosidade; outras relativas à vulnerabilidade a cheias e inundações da zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, com especificação das áreas afetadas; e onde se inventaria a localização dos máximos de profundidade e perigosidade registados em cada conjuntura de cheia simulada.

Capítulo IV – Conclusões:

Neste capítulo responde-se às perguntas e objetivos de investigação, coloca-se o trabalho desenvolvido em perspetiva, com sintetização de limites observados, e apontam-se sugestões para futuras ações de investigação.

A dissertação inclui ainda 6 anexos, mencionados aquando da explanação deste trabalho de investigação. O primeiro diz respeito às curvas de vazão da Estação Hidrométrica da Senhora da Rocha. O segundo consiste no ficheiro “GROWTH-DATABASE”, um dos inputs utilizados no modelo 3D. O terceiro, integra os hidrogramas relativos aos caudais afluentes à Estação de Laveiras, obtidos nos processos de modelação hidrológica e aplicados no modelo hidráulico. O quarto, com apresentação das áreas de observação utilizadas para efeitos de análise e quantificação do peso das precipitações extremas e/ou forçamento oceanográfico nas cheias e inundações da zona crítica. O quinto, relativo à resposta da variação do nível do mar na distribuição da profundidade máxima de inundação. E o sexto, que constitui a cartografia de áreas inundáveis da zona em estudo, associada aos períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, no cenário presente⁷ e futuro de alterações climáticas, para a situação normal de forçamento oceanográfico e de tempestade no mar.

⁷ Nesta dissertação, o cenário “presente” refere-se aos períodos de retorno obtidos a partir da amostra de PDMA observada.

Capítulo I - Enquadramento teórico

1. Visão geral do problema: Inundações e cenários de alterações climáticas – evidências de impactes futuros

1.1. Cheias e inundações – uma problemática de cariz global

A ocorrência de cheias e inundações advém de um processo complexo associado a vários fatores (condicionantes e desencadeantes), nomeadamente as características fisiográficas da bacia, as características físicas e geométricas do canal fluvial, o regime de precipitações, em particular a ocorrência de fenómenos de precipitação intensa, e a proximidade de zonas com influência de maré (Cunha et al., 2006; Jenkins et al., 2016; Leal, 2011). Contudo, as dinâmicas geográficas e socioeconómicas levam a uma maior exposição e vulnerabilidade, potenciando também a urbanização e consequente impermeabilização do solo, em especial nas zonas do litoral⁸ (Andrade et al., 2006; Leal, 2011; Santos, 2015).

Esta problemática ganha relevo, na medida em que, globalmente, constituem um dos desastres naturais mais comuns, acarretando inúmeras e nefastas repercussões na sociedade (Most & Marchand, 2017; Verwey et al., 2017).

De facto, aponta-se que, entre 1995 e 2015, as inundações representaram 47% dos desastres relacionados com o clima, tendo afetado um total de cerca de 23 mil milhões de pessoas, acrescido de 157000 vítimas mortais, e provocado prejuízos médios anuais globais na ordem dos US\$20 biliões (CRED & UNISDR, 2015; Munich Re, 2017; Verwey et al., 2017).

Para além disso, a frequência deste tipo de eventos tem aumentado ao longo das últimas décadas (ver figura I.1), verificando-se, a título de exemplo e segundo Verwey et al. (2017), uma média anual de 171 inundações com prejuízos considerados relevantes⁹ entre 2005 e 2014, em comparação com as 121 observadas na década precedente (Munich Re, 2018, 2017).

Em Portugal também houve registo de fenómenos de cheias e inundações com consequências significativas, como é exemplo as sucedidas em 1967 e 1983 na Área Metropolitana de Lisboa Norte. Nestes casos foram contabilizadas 14 e 8 ocorrências, respetivamente, nomeadamente nas bacias hidrográficas da ribeira de Barcarena e do rio Jamor, entre outras. A nível de fatalidades, foram estimadas cerca de 700 e 10 mortes, respetivamente. (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Câmara Municipal de Sintra, 2014; Gaspar, 2013; Leal, 2011; Ramos & Reis, 2001)

De acordo com Leal (2011) e Ramos & Reis (2001), o carácter destrutivo das cheias e inundações rápidas de 1967 deveu-se, para além dos quantitativos de precipitação registados, às características físicas e antrópicas das bacias hidrográficas e existência de áreas com elevada densidade populacional, à destruição da vegetação em áreas declivosas e à existência de terrenos agrícolas abandonados e de vias não alcatroadas em bairros de génese ilegal. Estes, dotaram os cursos de água de grandes cargas sólidas,

⁸ Termo geral que descreve as porções de território que são influenciadas direta e indiretamente pela proximidade do mar, de acordo com Santos et al. (2017).

⁹ Constituem eventos com prejuízos considerados relevantes aqueles que excedem os limites definidos de perdas e/ou fatalidades gerais normalizadas. Isto é, fatalidades ≥ 1 e/ou prejuízos \geq US\$100mil, 300mil, 1milhão ou 3milhões, dependendo do grupo de rendimentos atribuído pelo Banco Mundial a cada país afetado (Munich Re, 2019).

que atingiram habitações clandestinas instaladas nos leitos de cheia e alguns prédios construídos na margem do leito menor das ribeiras, que acabaram por ruir por sapamento lateral (Leal, 2011; Ramos & Reis, 2001). Adicionalmente, também a presença de aterros transversais às linhas de água, contribuiu para o agravamento dos efeitos da cheia (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Leal, 2011; Ramos & Reis, 2001).

As cheias de 1983 tiveram um carácter destrutivo substancialmente inferior, uma vez que, após o sucedido em 1967, verificou-se um aumento de legislação de carácter regulador e procedeu-se à remoção de bairros clandestinos e de obstáculos ao escoamento (Leal, 2011; Ramos & Reis, 2001).

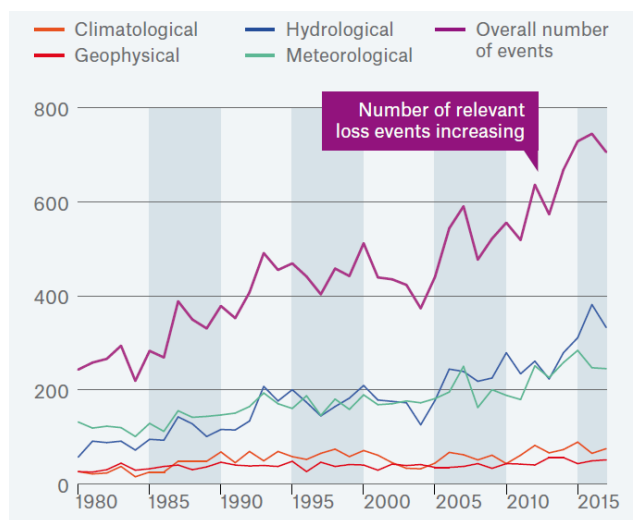


Figura 1.1 – Número de desastres naturais com prejuízos considerados relevantes, no período histórico de 1980 a 2017. Por ordem decrescente de ocorrências: linha azul representa os eventos associados a desastres de origem hidrológica, que inclui inundações e movimento de massas; linha verde representa os de origem meteorológica, que inclui tempestades tropical, extratropical, convectiva e local; linha laranja representa os de origem climática, que inclui temperaturas extremas, seca e incêndios; linha vermelha representa os de origem geofísica, que inclui terremotos, tsunamis e atividade vulcânica. (Fonte: Munich Re, 2018)

Há que referir, contudo, que cada evento de cheia e inundação constitui um evento distinto, e portanto, em termos de condicionantes e desencadeantes, reveste-se de características específicas, intrínsecas à área atingida (Leal, 2011). Mas claro está que o ordenamento do território pode representar uma agravante aos danos provocados por eventos de cheia e inundações rápidas (Lopes, 2017).

De referir também que por mais propícia que seja a ocorrência de cheias e inundações numa determinada bacia hidrográfica, tal não é passível de acontecer sem que ocorram precipitações (sendo que as características da precipitação influenciam o carácter das cheias) ou outros eventos extremos, como por exemplo o colapso de barragens, entre outros (Andrade et al., 2006; Cunha et al., 2006; Leal, 2011; Santos, 2015). É por isso importante fazer uma análise da problemática no ponto de vista das alterações climáticas.

1.2. Cenários de alterações climáticas – projeções e suas implicações nas cheias e inundações

As alterações climáticas são reconhecidas como um dos maiores desafios do século XXI, constituindo uma preocupação de cariz mundial. Esse reconhecimento assenta em inúmeros estudos científicos que foram realizados ao longo das últimas décadas, que permitem não só uma maior compreensão sobre os mecanismos causadores dessas alterações, como também avaliam e projetam as alterações climáticas futuras (nomeadamente no que respeita às modificações nos padrões de temperatura, precipitação, nível

médio do mar, entre outros) e os riscos e impactos subsequentes (ver e.g. EEA, 2017; IPCC, 2014, 2013, 2012, 2007).

Seguidamente são abordadas, ainda que sucintamente, essas duas vertentes. Primeiro será feita uma introdução à questão das alterações climáticas antropogénicas, ou seja, de origem humana, e depois serão abordados os cenários climáticos futuros projetados a nível global, regional e/ou local.

1.2.1. Fundamentos básicos das alterações climáticas e suas evidências

O sistema climático do planeta Terra é um sistema complexo e interativo que ocorre ao nível da superfície terrestre, criosfera, oceanos e outros corpos de água e atmosfera (IPCC, 2007).

Reconstituindo a história do clima do planeta, verificam-se profundas variações que se manifestam em ciclos relativamente bem definidos, alterando entre períodos glaciares frios e períodos interglaciares relativamente quentes (Santos, 2006).

Contudo, verificou-se um aumento nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) de origem antropogénica iniciado pela industrialização e impulsionado em grande parte pelo crescimento económico e populacional (IPCC, 2014). Os efeitos dessas emissões foram detetados em todos o sistema climático, e são, de acordo com o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2014), extremamente prováveis¹⁰ de ter sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX – no período de 1880 a 2012 registou-se um aquecimento de 0,85°C (ver figura I.2).

A título de exemplo, entre 1970 e 2010, as emissões antropogénicas de GEE¹¹ subiram de 27(±3,2) para 49(±4,5) GtCO₂-eq/ano, crescendo em média 1 GtCO₂-eq/ano (2,2%) entre 2000 e 2010, em comparação com 0,4 GtCO₂-eq/ano (1,3%) entre 1970 e 2000 (Blanco et al., 2014; IPCC, 2014).

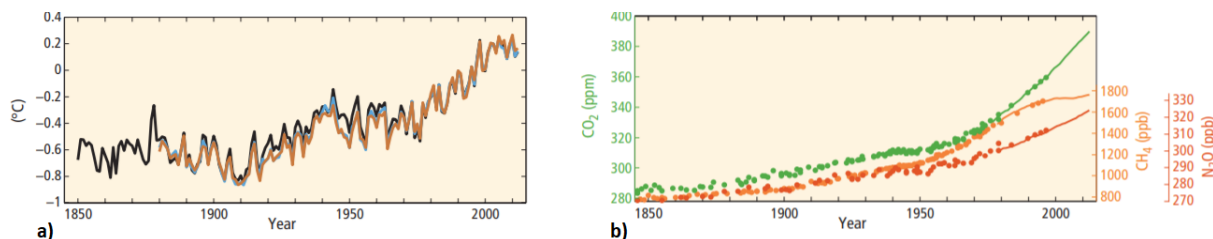


Figura I.2 – Observações das alterações climáticas: a) Anomalias da temperatura média global da superfície. Para a elaboração deste gráfico foram calculadas as médias das anomalias das temperaturas superficiais terrestres e oceânicas globais, para cada ano, tendo como referência a média durante o período de 1986 a 2005. As diferentes cores referem-se a dados com diferentes origens. b) Concentrações médias globais de dióxido de carbono (CO₂, a verde), de metano (CH₄, a cor de laranja) e de óxido nitroso (N₂O, a vermelho), determinadas a partir de análises a testemunhos de gelo (pontos) e de medições atmosféricas diretas (linhas). ppm e ppb refere-se a partes por milhão e partes por mil milhões, respetivamente. (Fonte: adaptado de IPCC, 2014)

Durante o período de 1901 a 2010, também o nível médio global do mar (NMGM¹²) subiu cerca de 20 cm (ver figura I.3), registando, durante o século XX, uma taxa de aumento médio anual de 1,7 mm, enquanto que a partir de 1993 esta situava-se entre os 2,8 e 3,6 mm (IPCC, 2014; Santos et al., 2017).

¹⁰ Na escala de probabilidade do IPCC, “*extremely likely*” corresponde a uma probabilidade de ocorrência acima dos 95%.

¹¹ As concentrações de CO₂ aumentaram cerca de 40% entre o período pré-industrial e 2011 (passando de 280 partes por milhão em volume, ppmv, para 391 ppmv, respetivamente), sendo que o oceano absorveu aproximadamente 30% dessas emissões antropogénicas, tendo como consequência a sua acidificação, dilatação térmica, entre outros (IPCC, 2013). Note-se que o CO₂ é o mais importante GEE em termos de forçamento radiativo, cujas emissões antropogénicas resultam essencialmente da combustão de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e da desflorestação.

¹² A variação do NMGM, ou variação eustática, mede-se relativamente ao centro gravítico da Terra e resulta de uma variação do volume total da água dos oceanos e/ou de uma variação do volume das bacias oceânicas (Santos et al., 2017).

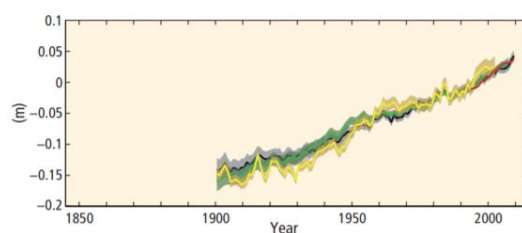


Figura I.3 – Variação do NMGM em relação ao período de 1850 a 2005. As cores indicam diferentes conjuntos de dados, sendo que estão alinhados para ter o mesmo valor em 1993, o primeiro ano de dados de altimetria de satélite (linha vermelha). Onde avaliadas, as incertezas são indicadas por sombreamento colorido. (Fonte: adaptado de IPCC, 2014)

1.2.2. Cenários de alterações climáticas: projeções globais, regionais e/ou locais

Em 1992, o IPCC divulgou cenários de emissões a serem utilizados como dados de base em modelos de circulação global, de forma a desenvolverem-se cenários de alterações climática. Os denominados IS92 foram, assim, os primeiros cenários globais a fornecer estimativas para todo o conjunto de GEE. (IPCC, 2000; Ribeiro, 2017)

Mais tarde, em 2000, publicaram um novo relatório, o *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), onde apresentam um conjunto de cenários de futuros possíveis, com a premissa de que as emissões futuras dependem de um conjunto de fatores, nomeadamente o desenvolvimento socioeconómico, e classificados em quatro linhas alternativas de desenvolvimento futuro: as famílias A1, A2, B1 e B4 (IPCC, 2000).

Mais recentemente, no quinto relatório do IPCC, desenvolveram novos cenários de emissões para o final do século XXI, a que correspondem quatro trajetórias designadas por *Representative Concentration Pathways* (RCP) – os RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, cujas características estão apresentadas na tabela I.1 – desenvolvidos a partir de valores de forçamento radiativo¹³. Esses novos cenários especificam as concentrações e emissões correspondentes, sem se basearem diretamente em cenários socioeconómicos (IPCC, 2014, 2013; Ribeiro, 2017). A abordagem utilizada passa pela categorização da quantidade de energia retida na atmosfera, podendo os diferentes cenários socioeconómicos, entretanto reformulados, ser combinados para a obtenção de um determinado cenário de forçamento radiativo futuro (Dias, 2016; IPCC, 2014).

Tabela I.1 – Descrição dos quatro cenários RCP apresentados no quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2014).

Cenário	Política climática associada ao cenário	Forçamento radiativo em 2100	CO ₂ - equivalente em 2100
RCP2.6	Mitigação	Atinge os 3,0 W/m ² antes de 2100 e depois decresce até aos 2,6 W/m ²	Pico em 490 ppmv
RCP4.5	Estabilização intermédia	Estabiliza nos 4,5 W/m ² após 2100	Pico em 650 ppmv
RCP6.0	Estabilização intermédia	Estabiliza nos 6,0 W/m ² após 2100	Pico em 850 ppmv
RCP8.5	Nenhuma (cenário com emissões muito elevadas de GEE)	Alcança valores superiores a 8,5 W/m ² em 2100 e continua a aumentar durante algum tempo	Pico em 1370 ppmv

¹³ O forçamento radiativo é a variação energética por unidade de área (expresso normalmente em W/m²), medida no topo da atmosfera e traduz a importância relativa da contribuição dos principais gases com efeito de estufa.

De acordo com o mesmo relatório, múltiplas linhas de evidência indicam uma relação forte, consistente e quase linear entre as emissões cumulativas de CO₂ e a variação da temperatura global projetada para 2100 e anos subsequentes, sendo provável¹⁴ que no cenário menos severo (RCP2.6), a temperatura média global até ao final do século XXI (2081-2100), em relação a 1986-2005, deverá subir entre 0,3 e 1,7°C, enquanto que no cenário mais grave (RCP8.5) deverá subir entre 2,6 e 4,8°C (ver figura I.4a).

Os eventos meteorológicos extremos são também muito abordados no âmbito das alterações climáticas (Ribeiro, 2017). De acordo com o IPCC (2012), os eventos extremos são definidos como a ocorrência de um valor de uma variável meteorológica acima (ou abaixo) de um valor limite próximo do máximo (ou mínimo) da gama de valores da referida variável, por períodos de tempo que podem ser inferiores a um dia ou durar algumas semanas. São exemplos de eventos meteorológicos extremos, as ondas de calor e de frio, as precipitações extremas (com consequências nas cheias e inundações), entre outros.

Nesta linha, é muito provável¹⁵ que as ondas de calor ocorram com maior frequência e com uma duração mais longa, e é praticamente certo¹⁶ que a frequência de extremos de calor aumente na maioria das regiões do mundo, ao contrário dos extremos de frio que serão cada vez menos frequentes, quer em escalas diárias como sazonais (IPCC, 2014).

Acontece que o aumento da temperatura média global vai ter repercussões também ao nível dos oceanos, nomeadamente a subida do nível médio do mar (NMM), consequente da dilatação térmica das águas superficiais oceânicas, do degelo dos glaciares das montanhas e do degelo dos glaciares e campos de gelo situados acima do nível do mar nas regiões polares (EEA, 2017; IPCC, 2014). Para além disso, ao longo do século XXI, os oceanos irão também continuar a aquecer e acidificar (IPCC, 2014, 2013).

O aumento do NMM não será uniforme em todo o planeta¹⁷, no entanto são projetados para o período de 2081-2100 (ver figura I.4b), em relação a 1986-2005, prováveis incrementos médios de 0,26 a 0,55 m para o cenário menos severo (RCP2.6) e de 0,45 a 0,82 m para o cenário RCP8.5 (confiança média¹⁸), cuja taxa de elevação será, muito provavelmente, superior à observada entre 1971 e 2010 (IPCC, 2014).

A par com o aumento da temperatura global à superfície, é também muito provável que os eventos de precipitação extrema se tornem mais frequentes e intensos na maioria das superfícies continentais das latitudes médias e nas regiões tropicais húmidas (IPCC, 2014).

Portanto, as alterações dos padrões de precipitação, a nível global, não serão uniformes, sendo, em muitas das regiões secas das latitudes médias e subtropicais, provável que se observe uma diminuição da precipitação média anual, enquanto que nas regiões húmidas das latitudes médias é provável que a precipitação aumente, isto considerando o cenário RCP8.5 (IPCC, 2014).

Com as alterações climáticas é, assim, expectável um novo incremento na probabilidade e magnitude do risco de inundação, potenciado pelo desenvolvimento demográfico e económico, em especial nas zonas de planícies aluviais e costeiras (IPCC, 2014; Most & Marchand, 2017).

¹⁴ Na escala de probabilidade do IPCC, “*likely*” corresponde a uma probabilidade de ocorrência acima dos 66%.

¹⁵ Na escala de probabilidade do IPCC, “*very likely*” corresponde a uma probabilidade de ocorrência acima dos 90%.

¹⁶ Na escala de probabilidade do IPCC, “*virtually certain*” corresponde a uma probabilidade de ocorrência compreendida entre 99 e 100%.

¹⁷ De acordo com o IPCC (2014), no final do século XXI, é muito provável que o nível do mar (NM) aumente em mais de 95% da área oceânica e que cerca de 70% da linha costeira assistirá a alterações no NM variáveis entre $\pm 20\%$ da média global.

¹⁸ De acordo com o InterAcademy Council (2010), “*medium confidence*” corresponde a um grau de confiança de 5 em 10 de estar correto.

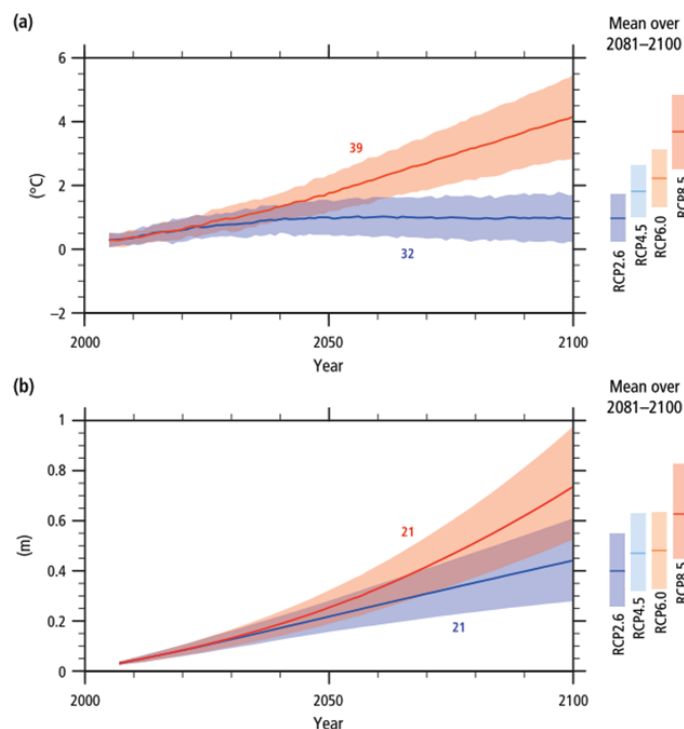


Figura 1.4 – Projeções das alterações climáticas para os cenários RCP2.6 (azul) e RCP8.5 (vermelho): Alteração da temperatura média global da superfície (a) e subida do NMGM¹⁹ (b), entre 2006 a 2100, em relação a 1986–2005. As médias (linha) e incertezas médias associadas (sombreado), entre 2081 a 2100, estão representadas sob a forma de barras verticais coloridas no lado direito de cada painel, considerando todos os cenários RCP's. É também apresentado o número de modelos Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) utilizados para determinar essas médias. (Fonte: Adaptado de IPCC, 2014)

De facto, e numa perspetiva regional, vários estudos apontam, para Portugal, um aumento da intensidade e frequência de eventos de precipitação extrema e do NMM, com consequências significativas para as cheias e inundações (Ciscar et al., 2014; Dias, 2016; EEA, 2017; Hov et al., 2013; IPCC, 2013, 2012).

Numa perspetiva regional e local, são também disponibilizadas outras projeções para o final deste século (2070-2100), para a área em estudo²⁰ na presente dissertação.

De acordo com Miranda et al. (2006), é estimado que a temperatura máxima no verão suba de 24-28°C (1961-1990) para 30-34°C, projetando-se também um aumento dos dias de verão²¹, de 50 a 60 dias por ano para 100 a 180 dias, e um aumento de dias muito quentes²², de menos de 5 dias por ano para 20 a 60 dias. Relativamente à precipitação média anual, estima-se uma diminuição de 10 a 30% (Miranda et al., 2006).

Quanto à variação do NMGM, este tem-se medido por meio de marégrafos, desde o século XVIII, e de satélites que utilizam radares altimétricos, desde 1992. Em Portugal existem também diversos marégrafos que registam as variações do nível médio local do mar (NMLM), sendo, para o caso particular da área em estudo na presente tese, considerado os registos do marégrafo de Cascais, que foi ativado em 1882 (Santos et al., 2017). Aqui, o NMM correspondente à média das médias anuais do

¹⁹ De acordo com o IPCC (2014), caso, e apenas, ocorresse o colapso dos setores marítimos da camada de gelo da Antártica, o NMGM poderia ser substancialmente maior do que a faixa de valores projetados, havendo confiança média de que essa contribuição adicional não excederia vários decímetros à elevação do nível do mar durante o século XXI.

²⁰ Bacias hidrográficas da ribeira de Barcarena e do rio Jamor. Embora este trabalho se foque na bacia de Barcarena, teve-se de considerar as características do rio Jamor aquando a calibração e validação do modelo. No Capítulo II encontra-se a justificação deste critério.

²¹ Número de dias com temperaturas superiores a 25°C.

²² Dias com temperaturas superiores a 35°C.

período compreendido entre 1882 e 1938, o qual define o *Datum* Altimétrico Nacional de 1938²³ (Antunes, 2014, 2012).

Da análise de séries longas, verificou-se que o litoral de Portugal Continental teve uma taxa de aumento médio anual do NMLM de $1,5 \pm 0,2$ mm/ano, entre 1882 e 1990 (Dias & Taborda, 1988), e de 1,9 mm/ano, entre 1920 e 2000 (Antunes & Taborda, 2009). Estes valores estão muito próximos da taxa anual de variação do NMGM para o mesmo período de tempo (Santos et al., 2017), pelo que se assume que a subida média do mar a nível global terá um comportamento idêntico para Cascais.

De acordo com Antunes (2016), no período de 1992 a 2004, a taxa de aumento médio anual do NMLM medido pelo marégrafo de Cascais foi de 2,2 mm/ano, e no período de 2005 a 2016, foi de 4,1 mm/ano (ver figura I.5), sendo que no ano 2000 o NMM estava 12 cm acima do NMM1938, passando para os 18,1 cm em 2014 (Antunes, 2016; Rocha, 2016).

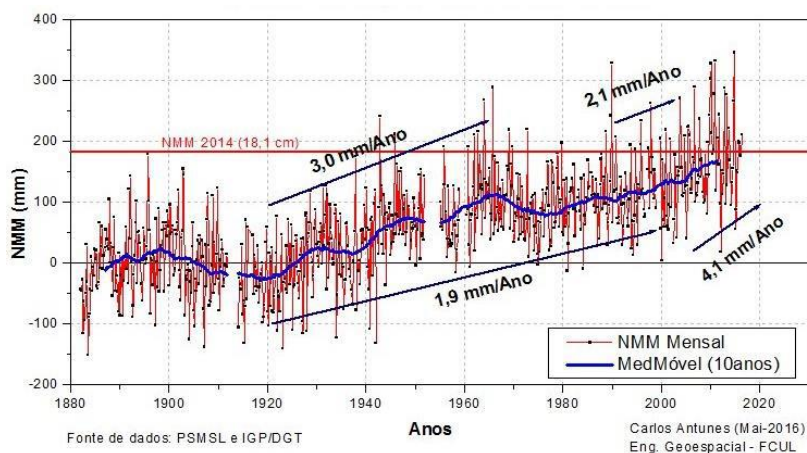


Figura I.5 – Medições do NMLM obtidas com o marégrafo de Cascais (séries médias mensais). (Fonte: PSMSL e IGP/DGT; Antunes, 2016; Rocha, 2016)

2. Modelação de cheias e inundações rápidas

2.1. Abordagem da modelação

Na modelação de cheias e inundações rápidas são frequentemente utilizados modelos hidrológicos e hidráulicos (ver e.g. Action Modulers, 2013; Buta et al., 2018; Dias, 2016; Papaioannou et al., 2016; Sangati et al., 2009). Estes, permitem reproduzir uma determinada cheia considerando um variável número de parâmetros capazes de representar, de modo simplificado e aproximado, a complexa realidade de uma dada região, geralmente uma bacia ou sub-bacia hidrográfica (Beraza, 2015; Dias, 2016; Lopes, 2017; Santos, 2015).

Com a modelação hidrológica é possível estimar os caudais de ponta de cheia para os diferentes períodos de retorno, sendo assim possível delimitar as zonas inundáveis associadas. Já a modelação hidráulica estima diferentes parâmetros hidráulicos (por exemplo, a velocidade e profundidade da água) sob determinadas condições “encaixantes” (em particular a topografia e rugosidade) e, consequentemente, possibilita a determinação dos níveis de inundação associados. (Dias, 2016; Díez Herrero et al., 2008; Santos, 2015)

²³ O sistema altimétrico em Portugal Continental é definido a partir de uma referência materializada, o *Datum* Altimétrico de Cascais de 1938.

As cheias e inundações, além de variáveis no espaço e no tempo, são também fortemente condicionadas pelo terreno. Por isso, são indispensáveis três grandes grupos de informação aquando a simulação destes processos: o modelo digital de terreno (MDT), cartas de uso e ocupação do solo, e dados históricos (Dias, 2016).

Através do MDT é possível atribuir uma elevação para cada célula da malha computacional, sendo posteriormente exequível derivar outros dados hidrológicos, tais como as linhas de água, a delimitação da bacia hidrográfica e o declive do terreno (Action Modulers, 2016; APA et al., 2014; MOHID Wiki, 2018).

A escolha da sua resolução merece ponderação, principalmente para produzir uma cartografia de áreas inundáveis e risco de inundação, uma vez que a identificação de pequenas alterações do relevo pode ficar condicionada (Dias, 2016). Não obstante, quanto maior a resolução, maior é o número de interações a realizar e, conseqüentemente, maior o tempo de computação (Action Modulers, 2016). Neste sentido, é recomendada a utilização de um MDT com resolução horizontal de 1 a 10 m²⁴ (Dias, 2016; Ernst et al., 2010).

Este tipo de informação pode estar disponível em várias plataformas, nomeadamente em sítios específicos da internet²⁵. Todavia, nem sempre têm a resolução necessária para a realização deste tipo de estudos, podendo-se, para o efeito, adquirir dados topográficos (ou outros, caso existam) junto dos serviços municipais ou através de instituições governamentais²⁶ (Dias, 2016).

A informação referente ao uso e ocupação do solo permite diferenciar as componentes de rugosidade e permeabilidade de uma dada região, a partir dos elementos constituintes identificados. Cartas como o *Corine Land Cover*²⁷ são tipicamente recomendados pelos organismos europeus. Porém, podem também ser utilizados outros mapas com informação mais detalhada, nomeadamente as Cartas de Ocupação do Solo²⁸. (Dias, 2016)

Por fim, concernente à informação histórica, ressalta-se a sua importância nos processos de calibração e validação de modelos, sendo exemplos deste tipo de dados os mapas de áreas inundáveis previamente publicados, os registos históricos dos níveis de caudal ou de eventos de precipitação extrema que tenham dado origem a situações de cheias e inundações, etc. (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Câmara Municipal de Sintra, 2014; Dias, 2016). Estas informações podem ser compiladas através da consulta de notícias de jornais ou obtidas junto de serviços municipais, por exemplo.

Na literatura, facilmente se encontram estudos que envolvam *softwares* que têm como base modelos matemáticos, pelo simples facto de constituírem uma ferramenta imprescindível na compreensão dos processos naturais que ocorrem à escala da bacia ou sub-bacia hidrográfica (da Silva Tavares et al., 2018; Telles et al., 2017).

Embora existam diversos *softwares* que permitem a caracterização de cheias e inundações com resultados satisfatórios, nem todos estão disponíveis para acesso e/ou download gratuito na internet ou

²⁴ Na literatura existem diversos estudos que comparam índices espaciais derivados de modelos digitais de terreno de diferentes resoluções, bem como os efeitos da resolução do MDT nos resultados dos processos de modelação hidrológica e hidráulica. O estudo de Ghaffari (2011) indica que a escolha da resolução depende da resposta de interesse da bacia em estudo, sendo que, para o caso de modelação de escoamentos, um MDT até 500 m de resolução apresentaram um erro relativo inferior a 1% nas previsões do modelo. À semelhança deste estudo, também Cotter et al. (2003) reportou que para a simulação do fluxo (entre outros), a resolução mínima dos dados MDT deve variar entre 30 a 300 m. Ambos os estudos consideraram o modelo SWAT.

²⁵ Por exemplo: <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm/>.

²⁶ Por exemplo, o Instituto Geográfico do Exército ou Instituto Geográfico Português.

²⁷ Consultar: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.

²⁸ Consultar, por exemplo: http://www.dgterritorio.pt/dados_abertos/cos/.

outros meios de divulgação, nem apresentam um ambiente GIS e interface numérica integrada (Telles et al., 2017).

Para a prossecução dos objetivos propostos na presente dissertação optou-se pela utilização do *MOHID*, que tem a vantagem de ter o código *open-source* disponível no GitHub²⁹, ter ferramentas para pré/pós-processamento, entre outros (Action Modulers, 2016; MARETEC, 2019).

2.2. MOHID Land: Descrição do modelo e aproximações teóricas

O *MOHID Land* é um modelo físico espacialmente distribuído que integra quatro meios ou compartimentos (rios, superfície, meio poroso e atmosfera), permitindo simular de forma integrada o escoamento na rede fluvial (1D *Drainage Network*), o escoamento superficial (2D *Overland Flow*), e o escoamento nas zonas não saturadas (camadas acima do nível freático) e saturadas (aquífero) do solo (3D *Porous Media*) (Brito et al., 2017, 2015; MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

Este modelo resolve as equações de conservação da massa e do momento, adotando o conceito de volumes finitos numa malha estruturada que pode ser retangular (de espaçamento constante ou variável) ou curvilínea no plano horizontal e do tipo cartesiano no plano vertical, e cujas variáveis de estado, como por exemplo o teor de água no solo, são calculadas no centro das células, enquanto que os fluxos e variáveis associadas são calculadas nas faces das mesmas (Bernard-Jannin et al., 2016; Braunschweig et al., 2004; Brito et al., 2017, 2015).

O meio da atmosfera, não sendo explicitamente simulado, é utilizado como condição de fronteira, de forma a avaliar os processos do solo/atmosfera através das propriedades meteorológicas (precipitação, velocidade do vento, radiação solar, humidade relativa do ar e temperatura do ar), que podem variar no tempo e no espaço (Brito et al., 2017; MOHID Wiki, 2018).

De referir que os processos simulados podem englobar a intersecção e evaporação nas folhas, a infiltração e evapotranspiração do solo/vegetação, o crescimento das plantas e/ou práticas agrícolas, a qualidade da água (reações químicas e biológicas no solo como mineralização, nitrificação, etc.), entre outros (Brito et al., 2017, 2015; MOHID Wiki, 2018).

Com isto em vista, o *MOHID Land* organiza-se em diferentes módulos, que lidam com processos específicos em meios específicos (MOHID Wiki, 2018). Desta forma, e consoante os objetivos do estudo, o modelo pode apresentar a estrutura modular que o utilizador considere necessária, não obstante existirem alguns módulos que são indispensáveis, pelo simples facto de interligarem os processos de outros módulos. São exemplos o “*Model*”, onde se define o período a simular e as características do passo temporal do modelo; o “*Atmosphere*”, que fornece os dados meteorológicos associados ao período em análise; o “*Basin Geometry*”, que fornece as informações relacionadas com o ponto de saída da bacia hidrográfica e o valor limite da área drenada na qual são desenhadas as linhas de água; o “*Geometry*”, que apresenta o número e espessura das camadas verticais do solo; e o “*Basin*”, que coordena a troca de informação e/ou da água entre os diferentes módulos (“*Drainage Network*”, “*Porous Media*”, “*RunOff*”) e determina os módulos opcionais a serem considerados no modelo (“*Vegetation*”, entre outros) (Beraza, 2015; MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018). Este módulo permite também ativar/desativar o cálculo da evapotranspiração mediante um determinado método, definido pelo utilizador, bem como ativar/desativar o método do *Curve Number*, onde os valores iniciais de escoamento superficial são espacialmente atribuídos ou definidos por um valor constante (MARETEC, 2019).

²⁹ Consultar: <https://github.com/Mohid-Water-Modelling-System/Mohid>.

Os módulos “*Drainage Network*” e “*RunOff*” permitem quantificar o escoamento das águas superficiais e configurar os valores do coeficiente de rugosidade de Manning, seja ele ao nível do canal como do solo, respetivamente. Enquanto que no primeiro módulo o Manning toma um valor contante, no segundo este pode ser tanto constante como espacialmente variado, sendo neste último caso necessário definir o caminho do ficheiro que integra essa informação (MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

O escoamento das águas superficiais é calculado com base na equação 2D de Saint-Venant (onda dinâmica – *Dinamic Wave*), na sua forma conservadora, para as duas direções horizontais da malha, conforme apresentado nas equações I.1 e I.2 (Bernard-Jannin et al., 2016; Chow et al., 1988).

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial Q_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial Q_x}{\partial y} = -g \cdot A \left(\frac{\partial H_a}{\partial x} + \frac{|Q| \cdot Q_x \cdot N_M^2}{A^2 \cdot R_h^{4/3}} \right) \quad \text{I.1}$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial Q_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -g \cdot A \left(\frac{\partial H_a}{\partial y} + \frac{|Q| \cdot Q_y \cdot N_M^2}{A^2 \cdot R_h^{4/3}} \right) \quad \text{I.2}$$

onde Q é o caudal na face da célula ao longo das duas direções horizontais da malha x e y (m^3/s), t corresponde ao tempo, v é a velocidade do escoamento nas direções x e y (m/s), g a aceleração da gravidade (m/s^2), A a área da secção transversal da coluna de água (m^2), H_a a altura da coluna de água (m), N_M é o coeficiente de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$), R_h o raio hidráulico (m), e x e y a distância ao longo das duas direções horizontais da malha (m).

De referir que há outras abordagens além da onda dinâmica (*Dinamic Wave*), como é exemplo a onda difusa (*Diffusion Wave*) e a onda cinemática (*Kinematic Wave*) (Beraza, 2015; MOHID Wiki, 2018). Enquanto a onda dinâmica considera todos os termos da equação de Saint Venant, representando o movimento inercial (aceleração local e convectiva) e os termos de pressão, gravitacional e de atrito; a onda difusa assume que o termo inercial é insignificante (logo a aceleração não é contabilizada); e a onda cinemática assume que as forças de atrito e gravitacionais estão equilibradas (logo a aceleração local e convectiva e a pressão não são contabilizadas) (Beraza, 2015; Chow et al., 1988; MOHID Wiki, 2018).

Relativamente ao módulo “*Discharge*”, este coordena todas as descargas pontuais do modelo, que tanto podem ser descargas de água simples como a concentração de uma determinada substância (por exemplo, salinidade, contaminantes, etc.), por exemplo. Aqui, o utilizador configura a localização e propriedades da descarga, podendo ela ser definida num ponto, ao longo de uma linha ou num polígono (MOHID Wiki, 2018). Importa referir que a “ativação” deste módulo procede-se no módulo “*Drainage Network*”, “*Porous Media*” e/ou “*RunOff*”, dependendo das características da descarga (MOHID Wiki, 2018).

No módulo “*Porous Media*” são definidos os horizontes e as propriedades do solo, de forma a calcular a vazão no meio poroso e no aquífero e estimar as trocas de água com os outros meios, seja a nível de infiltração, evapotranspiração, ou outro (MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

A velocidade da água no solo, que é calculada na interface de cada célula do meio saturado e não saturado, é descrita pela equação de Buckingham-Darcy (equação I.3) (Bernard-Jannin et al., 2016; Brito et al., 2015; MOHID Wiki, 2018):

$$v_i = -k(\theta) \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \quad \text{I.3}$$

onde v_i corresponde à velocidade da água na interface da célula ao longo da direção i (m/s), x_i é a distância ao longo da direção i (m), k a condutividade hidráulica (m/s), θ o teor de água na célula, e H o potencial matricial calculada no centro de cada célula (m).

A combinação entre esta equação e a equação de continuidade resulta na equação de Richards (equação I.4), que constitui a equação governamental para o cálculo do fluxo no meio poroso (Beraza, 2015; Bernard-Jannin et al., 2016; Brito et al., 2015; Richards, 1931), definida por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[k(\theta) \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] \quad \text{I. 4}$$

Para a quantificação da retenção de água no solo, o MOHID combina a equação proposta por Mualem (equação I.5 e I.6) – que calcula a condutividade da água em solos não saturados – e a equação proposta por Van Genuchten (equação I.7), relacionando o teor de água no solo, a condutividade hidráulica e a pressão efetiva (Bernard-Jannin et al., 2016; MOHID Wiki, 2018; Mualem, 1976; Ramos et al., 2011; Van Genuchten, 1980).

$$k(\theta) = k_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{1/(1-1/\eta)} \right)^{1-1/\eta} \right]^2 \quad \text{I. 5}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{I. 6}$$

$$h(\theta) = \left| \frac{(S_e^{-1/\eta} - 1)^{1/\eta}}{\alpha} \right| \quad \text{I. 7}$$

onde k_s é a condutividade hidráulica saturada (m/s), S_e o teor de água efetivo, θ_r o teor de água residual, θ_s o teor de água na saturação, L é um parâmetro empírico que descreve a conectividade/tortuosidade dos poros, α e η são parâmetros de ajustamento empírico, e h a pressão efetiva.

No que diz respeito ao módulo “*Vegetation*”, este trabalha com informações relativas ao coberto vegetal e interage com as propriedades da atmosfera e do solo, permitindo calcular a evolução do crescimento da vegetação (quer a nível da profundidade das raízes, como da altura da planta ou biomassa) e simular a captação de água pelas plantas (MOHID Wiki, 2018). Este módulo também permite gerir as práticas agrícolas, sendo possível aplicar pesticidas e fertilizantes, alterar as datas de plantio e colheita, entre outros (MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018). O tipo de uso do solo é identificado mediante um ID que está relacionado a uma base de dados onde estão caracterizados os parâmetros de crescimento da vegetação (MARETEC, 2019).

O cálculo da evapotranspiração inicia-se com a evapotranspiração de referência, ET_o , que pode ser um valor atribuído pelo utilizador ou obtido pelo método de Pennan-Monteith³⁰ (Brito et al., 2017; MOHID Wiki, 2018). Posteriormente, é quantificada a evapotranspiração da cultura, ET_c ³¹, combinando o coeficiente de cultura, Kc , e a evapotranspiração de referência (ver equação I.8), sendo depois a sua partição em transpiração potencial, Tp , e evaporação potencial, Ep , realizada em função do índice de área foliar, LAI (ver equações I.9 e I.10) (Beraza, 2015; Brito et al., 2017; MOHID Wiki, 2018).

$$ET_c = ET_o \times Kc \quad \text{I. 8}$$

$$Tp = ET_c \times (1 - e^{-0,463 \cdot LAI}) \quad \text{I. 9}$$

$$Ep = ET_c - Tp \quad \text{I. 10}$$

A transpiração real da colheita³² calcula-se a partir da transpiração potencial em função da distribuição das raízes e teor de água no solo de acordo com a função proposta por Feddes et al. (1978). Enquanto

³⁰ Cálculo realizado pelo módulo “*Atmosphere*”.

³¹ Obtido pelo módulo “*Basin*”.

³² Estimada pelo módulo “*Vegetation*”.

que a evaporação real do solo³³ pode ser limitada a partir da evaporação potencial ou através da função de condutividade hidráulica do solo, já que esta diminui com a secura do solo. (Beraza, 2015; Brito et al., 2017; MOHID Wiki, 2018)

Portanto, de forma sumária, o *MOHID Land* constitui um sistema modular que permite eleger os processos que se pretendem considerar, seleccionar as opções de simulação, estabelecer os valores dos diversos parâmetros, seleccionar o passo temporal a atribuir aos resultados do modelo e atribuir os caminhos dos arquivos de entrada e saída do modelo (Beraza, 2015; MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018). De referir que tanto os ficheiros de entrada (*inputs*) como de saída (*output*) do modelo podem constituir informação variável no tempo e no espaço, sob a forma de séries temporais (*Timeseries*) ou HDF5 (*Hierarchical Data Format*) (MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

O facto de o passo temporal de cálculo ser variável, permite que este seja ajustado ou reduzido de forma a atingir-se a estabilidade do modelo, já que por vezes o volume de água entre dois instantes de cálculo consecutivos varia mais do que o definido pelo utilizador (Bernard-Jannin et al., 2016; MARETEC, 2019; MOHID Wiki, 2018).

2.3. Avaliação do desempenho de um modelo

Clarificados os objetivos de modelação e selecionado o código numérico que melhor possa representar o problema em estudo, segue-se a “construção” do modelo, mediante a definição dos diferentes parâmetros e variáveis, representativos do sistema (Beraza, 2015). Neste processo são usualmente concretizadas três etapas: a implementação, calibração e validação do modelo (ver e.g. Action Modulers, 2013; Beraza, 2015; Santos et al., 2018).

Sumariamente, a implementação do modelo consiste na recolha e tratamento dos dados, de forma a que o modelo os entenda. Isto integra, essencialmente, a conversão e/ou interpolação da informação para uma dada malha ou rede computacional definida no modelo, com o auxílio de interfaces gráficas do utilizador existentes no *MOHID* (Action Modulers, 2016, 2013).

A calibração do modelo consiste no ajuste dos diferentes parâmetros, de forma a que o modelo implementado consiga obter uma boa relação entre os valores simulados e observados. O seu desempenho pode ser avaliado por comparação visual e/ou análise estatística dos dados (ver e.g. Action Modulers, 2013; Beraza, 2015; Bernard-Jannin et al., 2016; Santos et al., 2018). No ponto seguinte estão descritos os indicadores estatísticos utilizados nesta dissertação, que correspondem aos mais utilizados em estudos hidrológicos (da Silva et al., 2015; Golmohammadi et al., 2014; Moriasi et al., 2007; Santos et al., 2018).

A validação do modelo consiste em avaliar a eficiência do modelo, ou seja, na verificação da performance do modelo calibrado, considerando um período de análise distinto. Caso os resultados não sejam satisfatórios, o modelo deve ser novamente calibrado, até que a validação seja comprovada (ver e.g. Action Modulers, 2013; Beraza, 2015).

De referir que um modelo constitui uma simplificação da realidade, e que a sua aplicação está muitas vezes sujeita à interpretação hidrológica dos eventos. Por isso, a parametrização e soluções inerentes ao modelo incorporam por si só um certo grau de incerteza, mais ainda pela dependência da quantidade e qualidade dos dados adquiridos para a realização da simulação desses processos hidrológicos (Beraza, 2015).

³³ Primeiramente simulada pelo módulo “*Basin*” e posteriormente pelo módulo “*Porous Media*”.

2.3.1. Indicadores estatísticos

Como referido, a calibração do modelo envolve a otimização de parâmetros, sendo a comparação visual entre os dados simulados e medidos e a utilização de indicadores estatísticos uma forma de avaliar a performance ou qualidade dos processos de modelação – de certa forma, permite quantificar a incerteza associada (Brito et al., 2017).

Entre os vários parâmetros estatísticos que possam ser aplicados para avaliar os modelos, à escala da bacia hidrográfica, destacam-se o coeficiente de determinação (R^2), a percentagem de enviesamento entre simulações e observações (PBIAS), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e a razão RMSE-desvio padrão das observações (RSR).

O coeficiente de determinação (R^2) é dos indicadores mais importantes e representa a proporção dos valores observados que é explicada pelos valores simulados. O seu valor varia entre 0 e 1, sendo o valor máximo indicativo de que a dispersão dos dados simulados é a mesma que a dos dados observados, e o valor mínimo de que não existe correlação entre os dados observados e os simulados (Golmohammadi et al., 2014; Moriasi et al., 2007; Santos et al., 2018). Dado que a presente tese se cinge a cheias e inundações, a classificação do desempenho do modelo, considerando valores de caudal, é: para $R^2 > 0,85$, considerado muito bom; $0,75 < R^2 \leq 0,85$, bom; $0,60 < R^2 \leq 0,75$, satisfatório; e $R^2 \leq 0,60$, não satisfatório (Moriasi et al., 2015). De referir ainda que, caso o modelo tiver tendência para subestimar ou sobrestimar, este índice estatístico terá sempre um valor próximo de 1, pelo que se deve ter em conta outras variáveis de avaliação do modelo (Moriasi et al., 2007). Com a equação I.11 é possível calcular o coeficiente de determinação:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad \text{I. 11}$$

onde O corresponde aos valores observados, S corresponde aos valores simulados, a barra superior descreve a média para todo o período em avaliação, n é o número da amostra e $i = 1, 2, \dots, n$.

A percentagem de enviesamento (PBIAS), mede a tendência média dos dados simulados para serem maiores ou menores que os respetivos valores observados (Golmohammadi et al., 2014; Moriasi et al., 2007; Santos et al., 2018). Pode ser determinada com base na equação I.12, sendo que valores próximos de zero ou valores de baixa magnitude indicam uma simulação, em média, precisa. Valores positivos indicam que o modelo está a subestimar os valores, enquanto valores negativos indicam que o modelo está a sobrestimá-los (Moriasi et al., 2007). Este indicador estatístico é amplamente utilizado, e por isso existem também valores de referência para melhor estimar o erro, sendo, para $PBIAS < \pm 5\%$, considerado um desempenho do modelo muito bom; $\pm 5\% \leq PBIAS < \pm 10\%$, bom; $\pm 10\% \leq PBIAS < \pm 15\%$, satisfatório; e $PBIAS \geq \pm 15\%$, não satisfatório (Moriasi et al., 2015).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad \text{I. 12}$$

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), é um índice estatístico normalizado que determina a magnitude relativa da variação residual (“ruído”) em comparação com a variação dos dados medidos (Moriasi et al., 2007). Como se pode examinar na equação I.13, também é definida como 1 menos a razão entre a variância do erro (diferença entre os valores observados e calculados) e a variância dos valores observados. Os seus valores podem variar entre $-\infty$ e 1, sendo que $NSE = 1$ indica um ajustamento perfeito entre os valores modelados e observados. Quando $NSE > 0,80$, o ajustamento é considerado muito bom; $0,70 < NSE \leq 0,80$, é considerado bom; $0,50 < NSE \leq 0,70$, é considerado satisfatório; e $NSE \leq 0,50$, considerado não satisfatório (Moriasi et al., 2015).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{I. 13}$$

A razão entre a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o desvio padrão dos dados observados (RSR), calculado com base na equação I.14, é um índice estatístico de erro amplamente utilizado (Moriasi et al., 2007). O seu valor pode variar entre o valor ótimo, zero, que indica uma RMSE ou uma variação residual igual a zero e, portanto, uma perfeita simulação do modelo, até um valor positivo elevado (Moriasi et al., 2007). Outras classes de valores de referência para a interpretação deste parâmetro são: $0 \leq RSR \leq 0,5$, desempenho muito bom; $0,5 < RSR \leq 0,6$, bom; $0,6 < RSR \leq 0,7$, satisfatório; e $RSR > 0,7$, não satisfatório (da Silva et al., 2015; Moriasi et al., 2007; Santos et al., 2018).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{I. 14}$$

Capítulo II - Materiais e métodos

1. Aspectos metodológicos e outras considerações

Na presente dissertação, os processos de modelação de cheias e inundações rápidas têm por base o modelo *MOHID Land*, que é, como já referido, um modelo numérico integrado no software *MOHID Studio* que permite simular os processos hidrológicos e hidráulicos que ocorrem numa determinada bacia hidrográfica (Action Modulers, 2016).

Assim, e de forma sucinta, os passos metodológicos basilares necessários para a consecução dos objetivos definidos passam pela:

- i) Recolha, tratamento e análise dos elementos base;
- ii) Caracterização da área de estudo;
- iii) Modelação hidrológica e hidráulica:
 - a. Calibração e validação do modelo para a situação de referência;
 - b. Simulação dos regimes de inundação associada a diferentes períodos de retorno tendo subjacente diferentes probabilidades de ocorrência (aplicação no cenário histórico e futuro de alterações climáticas) e situações de forçamento oceanográfico;
 - c. Apreciação dos resultados;
- iv) Produção de cartografia (áreas inundáveis, profundidade máxima de inundação e respetivos níveis de perigosidade).

Esta metodologia baseia-se na abordagem levada a cabo no PMAACO (Morais et al., 2019; Superlative Numbers, 2019), cujas ligações e dependências entre as fases estão representadas na figura II.1.



Figura II.1 – Síntese metodológica relativa à elaboração de uma cartografia de cheias e inundações rápidas. (Fonte: Moraes et al., 2019)

Como facilmente se compreende, os trabalhos de modelação dependem tanto da informação de base disponível, como das características e condicionantes próprias da área de estudo (ver figura II.2) (Morais et al., 2019). Isto porque, as cheias e inundações estão articuladas com diversos aspetos, nomeadamente as características da precipitação (intensidade, duração, quantidade, etc.), as características do solo e sua ocupação (infiltração, escoamento superficial, situações de deslizamento de terra, etc.), a existência de diques, barragens e/ou reservatórios, as condições de drenagem da bacia, a ocorrência de eventos de sobrelevação meteorológica ao longo das áreas costeiras, entre outros (IPCC, 2012; Ribeiro, 2017).

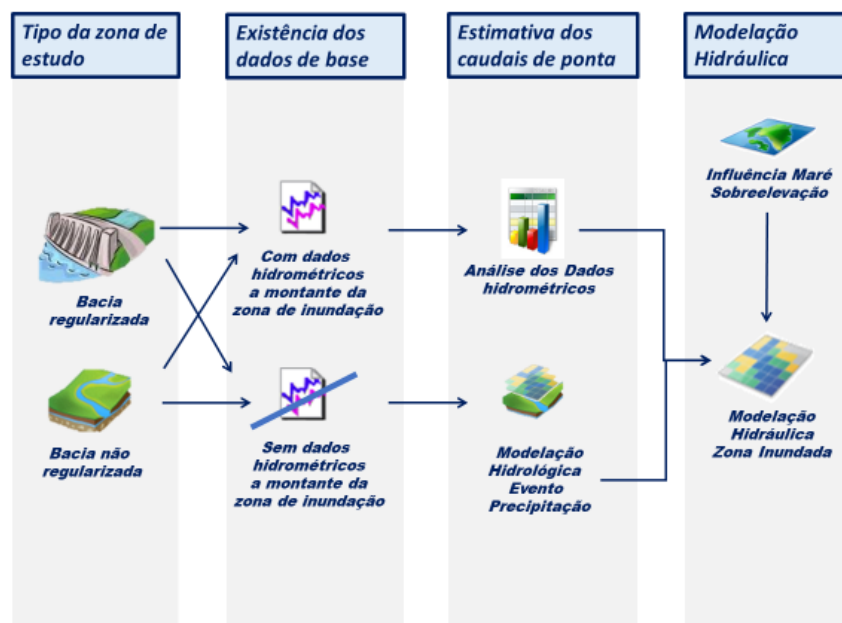


Figura II.2 – Abordagem integrada dos processos de modelação de cheias e inundações rápidas. (Fonte: Moraes et al., 2019)

A escolha do modelo hidrológico e do respetivo processo de calibração e validação é, também, de extrema importância, uma vez que incutem fiabilidade aos resultados obtidos. Não obstante, esses resultados são tanto mais confiáveis quanto maior o intervalo de tempo utilizado na modelação (Arnold et al., 2012; Santos et al., 2018).

Existem vários testes ou métodos que se possam aplicar aquando a calibração e validação do modelo, nomeadamente os propostos por Klemeš (1986), cuja estrutura hierárquica se subdivide em quatro grupos principais:

- i) *Split Sample test*, em que os dados históricos disponíveis são divididos em dois segmentos, sendo um deles utilizado para a calibração e o outro para a validação do modelo hidrológico, mediante aplicação dos mesmos parâmetros;
- ii) *Differential Split-Sample test*, que segue a abordagem do teste anterior, mas com a particularidade de os dados serem agrupados em períodos com parâmetros climáticos distintos, por exemplo um com alta precipitação média e outro com baixa precipitação média;
- iii) *Proxy-basin test*, que consiste na transposição geográfica de um modelo, nos casos em que as regiões apresentam condições edafoclimáticas semelhantes, e, portanto, o modelo é calibrado numa bacia e validado na mesma ou numa outra bacia;
- iv) *Proxy-Basin Differential Split-Sample test*, que é aplicado nos casos em que se pretende que o modelo hidrológico seja geográfica e climaticamente (ou em termos de uso do solo) transponível.

No presente trabalho foi aplicada a abordagem do *Proxy-basin test*, com calibração e validação do modelo hidrológico na bacia hidrográfica do rio Jamor e posterior transposição para a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena. Isto porque foram adquiridos dados em séries temporais concomitantes na Estação Hidrométrica da Sra. da Rocha e Estação Meteorológica de Caneças (ano hidrológico de 2010), enquanto que para o caso da bacia de Barcarena, a última curva de vazão disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH³⁴), na Estação Hidrométrica de Laveiras, data de 1990, não havendo, porém, dados referentes ao nível hidrométrico instantâneo para esse período. Estes dados e o referente à modelação hidrológica encontram-se detalhados nos subcapítulos II.3.1 e II.4.

2. Caracterização da área de estudo

Na sequência da aplicação da abordagem do *Proxy-basin test*, interessa fazer a caracterização sintetizada das bacias hidrográficas mencionadas.

Na figura II.3 é possível visualizar a localização geográfica das bacias, bem como de algumas das estações meteorológicas e hidrométricas existentes na zona, em consonância com os dados acessíveis no SNIRH.

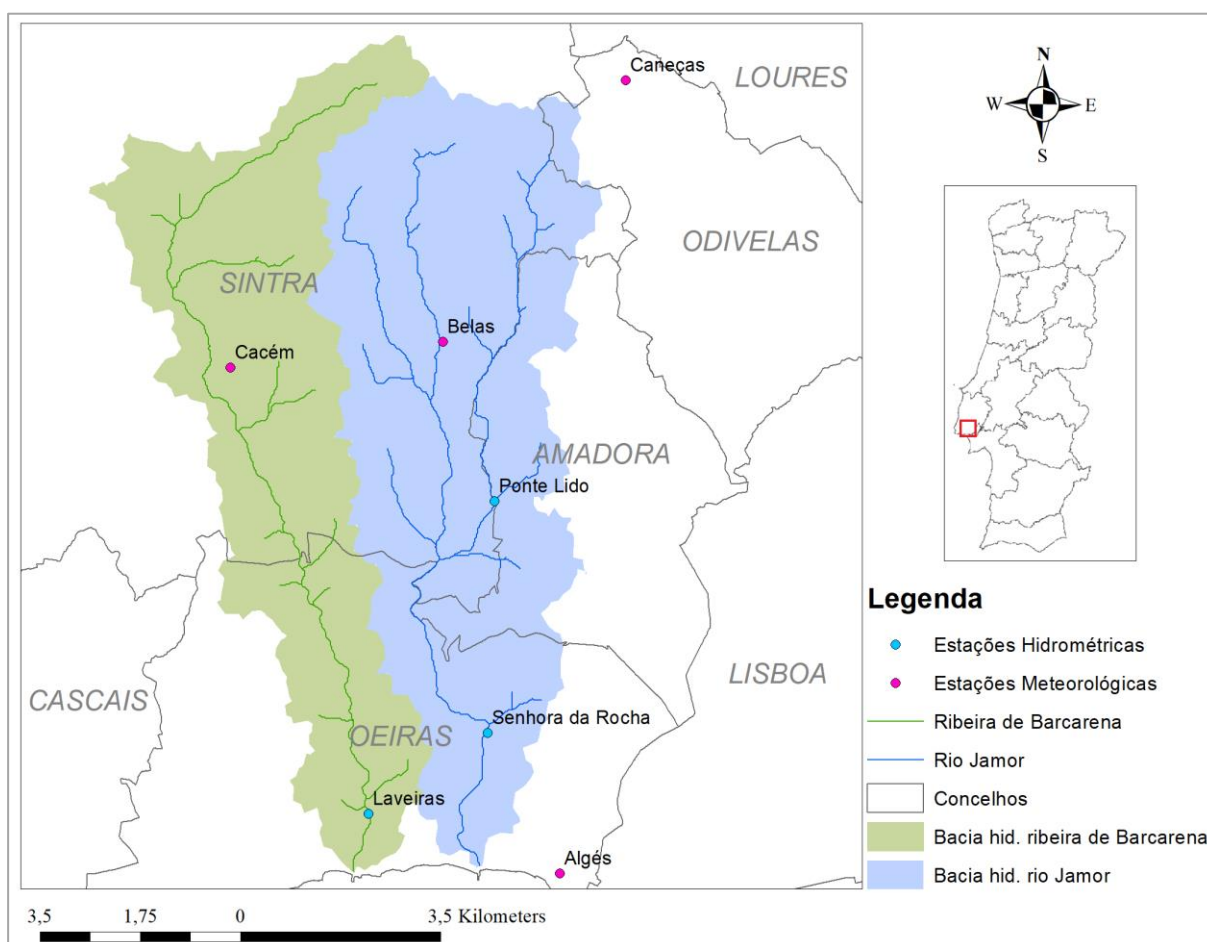


Figura II.3 – Enquadramento geográfico das BHRB e BHRJ e localização de algumas das estações hidrométricas (azul) e meteorológicas (rosa) mais próximas. As linhas cinzentas representam os limites dos concelhos da região onde se inserem.

³⁴ Consultar: <https://snirh.apambiente.pt/>.

A bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena abrange parte dos concelhos de Sintra e Oeiras, constituindo uma área total de 35 km² (Câmara Municipal de Oeiras, 2011a).

Esta bacia desenvolve-se desde a Serra da Carregueira até ao Estuário do rio Tejo, na localidade de Caxias, num curso total de aproximadamente 19 km e encontra-se delimitada a Este pela bacia do rio Jamor e a Oeste pelas bacias da ribeira de Porto Salvo e da Laje, exibindo uma forma marcadamente alongada, orientada segundo o sentido N-S (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Câmara Municipal de Oeiras, 2011a; Câmara Municipal de Sintra, 2014).

As suas cotas máximas rondam os 332 metros e localizam-se nas cabeceiras, próximo da povoação da Portela, sendo o declive médio do curso de água principal aproximadamente igual a 1,42% (Câmara Municipal de Oeiras, 2011a; Câmara Municipal de Sintra, 2014).

Além de apresentar uma densidade urbana elevada nas zonas adjacentes ao curso de água, ainda que significativamente inferior nas zonas de cabeceiras, a proximidade à rede viária tornou-a numa linha de água bastante intervencionada, regularmente delimitada por muros de betão e de pedra ou revestida com colchão Reno e enrocamento (Câmara Municipal de Oeiras, 2011a; Câmara Municipal de Sintra, 2014). O mesmo acontece com o rio Jamor, dando como exemplo o troço final da linha de água, nas imediações do Estádio Nacional (Câmara Municipal de Oeiras, 2011b).

Além dos concelhos de Sintra e Oeiras, o rio Jamor atravessa também o município de Amadora, apresentando uma área total de 44 km² (Câmara Municipal de Oeiras, 2011b).

Esta bacia desenvolve-se desde a encosta sul da Serra da Carregueira até ao Estuário do rio Tejo, na zona da Cruz Quebrada, num curso total de aproximadamente 15 km e encontra-se delimitada a Este pelas bacias da ribeira de Algés e de Alcântara e a Oeste pela bacia da ribeira de Barcarena, exibindo uma forma alongada e orientada no sentido N-S (Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d.; Câmara Municipal de Oeiras, 2011b).

As suas cotas máximas rondam os 342 metros e localizam-se nas cabeceiras, próximo da povoação de D. Maria, sendo o declive médio do curso de água principal aproximadamente igual a 1,49% (Câmara Municipal de Oeiras, 2011b).

Na tabela II.1 apresenta-se uma súmula das características geométricas principais das bacias hidrográficas da ribeira de Barcarena e do rio Jamor, para uma melhor comparação entre elas.

Tabela II.1 – Caracterização geométrica das bacias hidrográficas da ribeira de Barcarena e do rio Jamor. (Fonte: adaptado de Câmara Municipal de Oeiras, 2011b, 2011a).

Característica	Bacia da ribeira de Barcarena	Bacia do rio Jamor
Área total da bacia hidrográfica (km ²)	34,7	44,7
Perímetro da bacia hidrográfica (km)	50,4	44,9
Comprimento da linha de água principal (km)	19,2	14,7
Cota máxima da bacia (m)	332,0	342,0
Cota mínima da bacia (m)	0,0	0,0
Cota máxima do curso de água (m)	281,5	221,7
Cota mínima do curso de água (m)	0,0	0,0
Declive médio do curso de água principal (%)	1,42	1,49
Índice de compacidade de Gravelius	2,40	1,88
Fator de forma	0,09	0,15

Do ponto de vista geológico, as duas bacias são particularmente semelhantes, apresentando duas zonas bem distintas: a Norte, composta por terrenos sedimentares carbonatados de idade jurássica e cretácica (de permeabilidade média a elevada); a Sul, composta por formações do Complexo Vulcânico de Lisboa, do Cretácico terminal ou Neocretácico (de permeabilidade muito baixa) (Câmara Municipal de Oeiras, 2011b, 2011a; Leal, 2011).

Especificidades relativas aos tipos de solo da região estão representadas na figura II.4, cuja informação foi disponibilizada pelo Instituto da Água (INAG). Como se pode observar, as unidades pedológicas (de acordo com a classificação da FAO/UNESCO, para a carta dos solos da Europa) mais representativas da região, são os Cambissolos³⁵ e Luvisolos³⁶, a Norte; e os Vertissolos³⁷, a Sul.

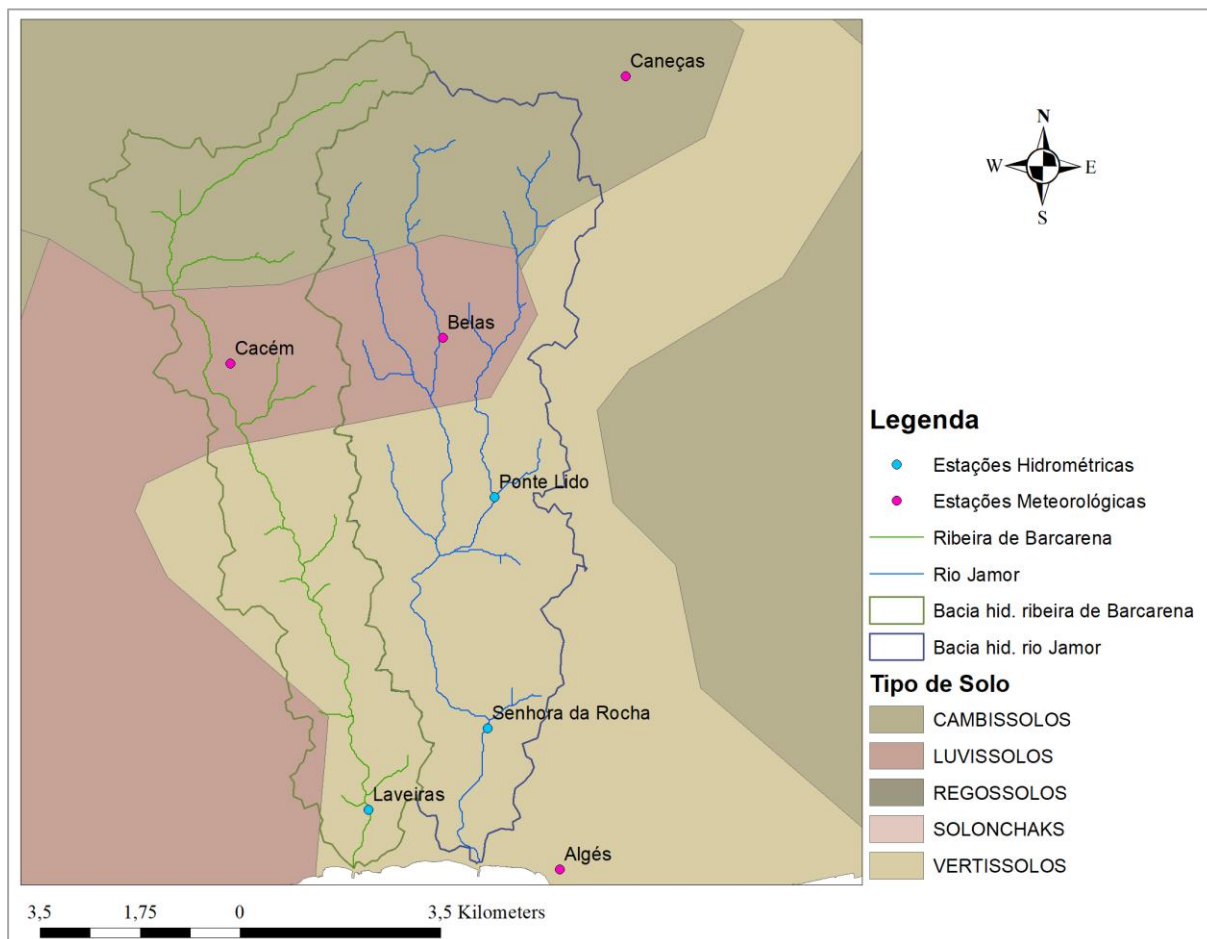


Figura II.4 – Carta de solos existentes na região em estudo, com delimitação das bacias hidrográficas e identificação de algumas das estações meteorológicas (rosa) e hidrométricas (azul) existentes.

O facto de a faixa mais a montante das bacias apresentar maior permeabilidade do que as faixas intermédias e jusante, faz com que possua maiores densidades de drenagem e hídricas (Leal, 2011). Para além da permeabilidade, também as características ao nível da topografia, do solo e do coberto vegetal têm influência na densidade da rede de drenagem (Leal, 2011).

³⁵ De acordo com Ferreira (2000), são solos “jovens, moderadamente desenvolvidos sobre uma rocha parental pouco a moderadamente meteorizada, não apresentando quantidades apreciáveis de argila, matéria orgânica e compostos de alumínio ou ferro”.

³⁶ De acordo com Ferreira (2000), são solos “que se caracterizam pela presença de um horizonte de acumulação de argila a determinada profundidade (...) quase sempre sobre rochas graníticas”.

³⁷ De acordo com Ferreira (2000), são solos que se caracterizam “por um elevado teor em argilas. Devido às características da esmectite são duros e apresentam fendas de retração quando estão secos e quando estão húmidos são viscosos e de comportamento plástico. São solos ricos, quanto a componentes químicos e geralmente contêm teores moderados de matéria orgânica”.

Conceitos sobre a topografia, uso e ocupação do solo, rede de drenagem, entre outros, estão descritos nos subcapítulos seguintes (especificamente nos II.3.1.2, II.4.2 e II.5.2), uma vez que integram os parâmetros considerados nos processos de modelação hidrológica e hidráulica do presente estudo.

3. Implementação, calibração e validação do modelo

3.1. Modelo 2D

3.1.1. Considerações gerais

A “construção” do modelo, mediante a definição de parâmetros e variáveis, é um processo extremamente importante, uma vez que consiste numa representação simplificada de uma situação de campo específica conhecida, e cujo desempenho é tanto melhor quanto maior for a relação entre os dados simulados e observados (Beraza, 2015; Santos et al., 2018).

É através de processos de calibração do modelo que se procura o ajuste dos parâmetros, considerando um determinado período de tempo, de forma a que as simulações se aproximem o melhor possível das observações (Action Modulers, 2013; Beraza, 2015). Uma vez calibrado, sucede-se a validação, que consiste essencialmente na verificação do desempenho do modelo considerando um período de análise distinto (Action Modulers, 2013; Santos et al., 2018). Caso não haja necessidade de ajustes subsequentes, o modelo encontra-se apto para realizar os processos de modelação hidrológica e hidráulica necessários à consecução dos objetivos definidos.

Nesta etapa do projeto, desenvolveu-se um modelo hidrológico bidimensional (2D), para a totalidade da bacia hidrográfica, que considera os módulos do escoamento superficial (“*RunOff*”) e da rede de drenagem (“*Drainage Network*”), de forma a calcular a precipitação/escoamento através do método do *Curve Number* (CN)³⁸. Isto, porque se investigam cheias e inundações rápidas, numa bacia caracterizada por tempos de concentração relativamente baixos (≈ 6 horas para a bacia hidrográfica do rio Jamor e ≈ 7 horas para a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena).

De notar que o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica representa o tempo necessário para que a água percorra toda a bacia, caso esta se encontre num estado próximo do natural. Embora possa ser determinado mediante várias formulações, a sua obtenção teve por base a fórmula de Temez Pelaez (1978), expressa na equação II.1³⁹, uma vez que é necessária apenas uma aproximação desse valor (Dias, 2016).

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L_{bk}}{i_m^{0,25}} \right)^{0,76} \quad \text{sendo} \quad i_m = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{L_{bm}} \quad \text{II. 1}$$

onde t_c é o tempo de concentração (h), L_{bk} o comprimento do curso de água principal da bacia (Km) e i_m o declive médio do curso de água principal da bacia. O parâmetro i_m pode ser obtido através da diferença de cotas entre a extremidade a montante, Z_{max} , e a jusante, Z_{min} , do curso de água principal sobre o seu comprimento em metros, L_{bm} (detalhes no subcapítulo II.2).

A definição da malha computacional, de espaçamento constante, foi feita de modo a abranger toda a bacia hidrográfica do rio Jamor (detalhes na tabela II.2, que constitui uma síntese das principais características do modelo calibrado e validado, que teve por base a BHRJ), com o intuito de se atribuírem

³⁸ O MOHID Land permite simular a divisão entre infiltração e escoamento superficial mediante diferentes aproximações, nomeadamente o método do *Soil Conversation Service* (SCS) designado *Curve Number*, o método do Green Ampt, e/ou simulando explicitamente as condições do solo (modelo 3D) recorrendo à equação de Richards (APA et al., 2014).

³⁹ A equação pode ser aplicada em bacias hidrográficas naturais com áreas inferiores a 3000 km².

os limites físicos e a resolução pretendida aos ficheiros de entrada do modelo, representativos dos parâmetros considerados relevantes.

Seguidamente, tecem-se algumas considerações sobre os ficheiros de entrada (*inputs*) utilizados no presente processo de modelação, que constituem os valores de referência ou de base do modelo, bem como outros aspetos relativos à parametrização e calibração do mesmo.

Tabela II.2 – Características principais do modelo calibrado e validado na bacia hidrográfica do rio Jamor.

Componente	Descrição
Malha de cálculo	Malha de espaçamento constante
Origem da malha	X: -9,2902 e Y: 38,6979
Tamanho das células	≈ 20x20 m
Nº de células	330 (colunas) x 640 (linhas)
Dados de base do MDT	Dados disponibilizados pelas CM de Oeiras, Sintra e Amadora Resolução do MDT de base (<i>raster</i>) ≈ 10 m
Módulos utilizados	<i>Atmosphere, Basin, Basin Geometry, Drainage Network, Model, RunOff</i>
Condições de fronteira	Precipitação horária Sem imposição do NM como condição de fronteira a jusante

3.1.2. Inputs do modelo – situação de referência

3.1.2.1. Modelo digital de terreno

Quando se trata de cheias e inundações, é de extrema relevância conhecer o relevo⁴⁰ da bacia, em particular no que concerne à inclinação das vertentes e do canal fluvial (Leal, 2011). Isto porque, quanto maior for o declive das encostas, menor é a infiltração, pois a velocidade do escoamento superficial tende a aumentar e, por conseguinte, menor é o tempo que a água leva a concentrar-se no leito fluvial (Leal, 2011). Também, quanto maior for a inclinação da linha de água, maior será a energia potencial do escoamento e maior a sua capacidade de transporte e erosão hídrica (Leal, 2011).

Portanto, o modelo requer como dado de entrada um MDT, de forma a que a cada ponto de cálculo da malha computacional seja atribuída uma elevação (Action Modulers, 2016; Braunschweig et al., 2016; MOHID Wiki, 2018).

O MDT de base utilizado tem resolução de 10 m e foi criado através dos dados topográficos disponibilizados pelas Câmaras Municipais de Oeiras, Sintra e Amadora, com aplicação de ferramentas de interpolação existentes no ArcGIS⁴¹. Neste caso, recorreu-se a *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Data Management > TIN > Create TIN*. Foi também aplicada a ferramenta *Fill* (em *Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*), de modo a remover pequenas imperfeições dos dados, através de processos de remoção/preenchimento de depressões.

Depois de adicionar este ficheiro do tipo *raster* ao *MOHID*, criou-se uma *Grid data* (*Toolbox > Grid Data > Construct from Raster*), cujo valor atribuído a cada célula resulta da interpolação dos dados de origem à malha computacional definida. Note-se que, como a malha de valores é consequente de uma

⁴⁰ Os elementos mais relevantes do relevo são: o declive, a posição relativa das serras ou montanhas, a exposição aos fluxos pluviogénicos, a altitude e o desnível (Leal, 2011).

⁴¹ Existem vários métodos de interpolação, como por exemplo: IDW (*Inverse Distance Weighting*), triangulação (TIN - *Triangulated Irregular Network*) e *kriging*.

interpolação, a resolução do MDT de base é extremamente importante, devendo este ter uma resolução igual ou superior à da malha definida (Action Modulers, 2016; MOHID Wiki, 2018).

Essa *grid data* foi novamente submetida a processos de remoção de depressões (*Toolbox > MOHID Land > Remove Depressions*), de forma a assegurar que cada ponto da malha computacional consiga drenar, por gravidade, a um dos seus oito pontos adjacentes, sendo assim possível derivar outros dados hidrológicos, nomeadamente o declive do terreno, a delimitação da bacia hidrográfica e as linhas de água (Action Modulers, 2016; Braunschweig et al., 2016; MOHID Wiki, 2018).

A delimitação da bacia hidrográfica tem múltiplos objetivos, nomeadamente a obtenção de algumas das suas características geométricas. No entanto, nesta situação serviu de apoio à definição da malha computacional, de forma a que esta se ajustasse o mais possível à bacia, e, por conseguinte, restringir os tempos de computação ao estritamente necessário. Saliente-se que as características geométricas da bacia em análise eram já conhecidas e estão detalhadas no subcapítulo II.2.

Concomitantemente à delimitação da bacia, através do *Toolbox > MOHID Land > Delineate Watershed* e seleção, no mapa, da localização pretendida para a saída da mesma, é também possível ativar a opção de criação das linhas de água (*Output Option > Network File*). Este processo pode ser controlado por intermédio de um parâmetro que define uma área drenada mínima a partir de qual se formam linhas de água, que neste caso corresponde a 10 hectares (valor aproximado de área drenada na qual são desenhadas as linhas de água nas cartas militares 1:25000) (APA et al., 2014).

Definida a distribuição da rede de drenagem no espaço, segue-se a definição da morfologia do canal (altura e larguras superior e inferior), que neste estudo foi feita de acordo com o número de *Strahler* (ou *Strahler order*), indo a *Toolbox > MOHID Land > Default Cross Sections*, e cujas secções estão definidas na tabela II.3.

Tabela II.3 – Características morfológicas da rede de drenagem do modelo de referência.

Número de Strahler	Altura (m)	Largura superior (m)	Largura inferior (m)	Área drenada ⁴² (km ²)
1 a	1	4	4	6,05
1 b	1	4	4	6,51
2	1,1	7	7	33,95
3	1,25	13	13	44,7

Ainda que o rio de Jamor seja uma linha de água relativamente intervencionada, não foram encontradas muitas informações alusivas à sua morfologia, ao longo de todo o seu comprimento. Não obstante, foram aqui considerados três critérios para a sua definição: pesquisa de documentação relativa a pormenores das medidas estruturais de regularização fluvial implementadas nos últimos anos (ver e.g. CMO & FCT, 2011); utilização do *Google Earth Pro*, que permite a visualização e medição aproximada da largura do canal; e a relação área drenada vs largura do canal descrita por Veitzer & Gupta (2001). Segundo estes autores, a largura máxima do canal pode ser considerada uma função de potência da área de drenagem da bacia hidrográfica, com expoentes entre 0,42 e 0,51 (Nunes, 2007; Veitzer & Gupta, 2001).

A figura II.5 evidencia os resultados da aplicação da abordagem de Veitzer & Gupta (2001), cujo expoente se enquadra nos valores proposto pelos autores. Aqui foram analisadas as larguras máximas médias atribuídas a cada número de Strahler e respetivas áreas drenadas (detalhes na tabela II.3).

Na figura II.6 estão representadas a delimitação da bacia hidrográfica (a preto) e as linhas de águas (a azul) geradas a partir do modelo digital de terreno (gradiente de cores).

⁴² Valores obtidos através do ArcGIS.

Importa referir que nos processos de modelação realizados no presente estudo não foram considerados obstáculos existentes na rede de drenagem (e.g. pontes, estrangulamentos, aterros, obras hidráulicas, entre outras estruturas) que não estivessem já definidos nos elementos de base do MDT⁴³, fornecidos pelas Câmaras Municipais de Oeiras, Sintra e Amadora. Foi, no entanto, definido um estrangulamento na passagem sob a A5, de forma a garantir que todas as células do MDT permitam um escoamento contínuo até à foz, em Cruz Quebrada. Também, e relativamente às zonas urbanas, não foi simulada qualquer rede de drenagem urbana (e.g. túneis, rede pluvial).

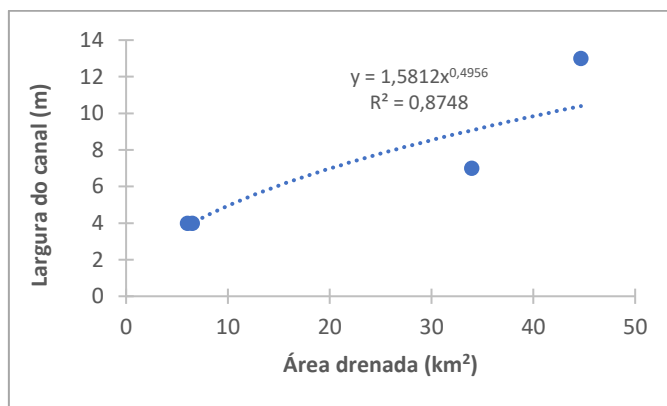


Figura II.5 – Relação entre a área drenada e a largura máxima do canal, para cada número de Strahler. Valores de referência do modelo.

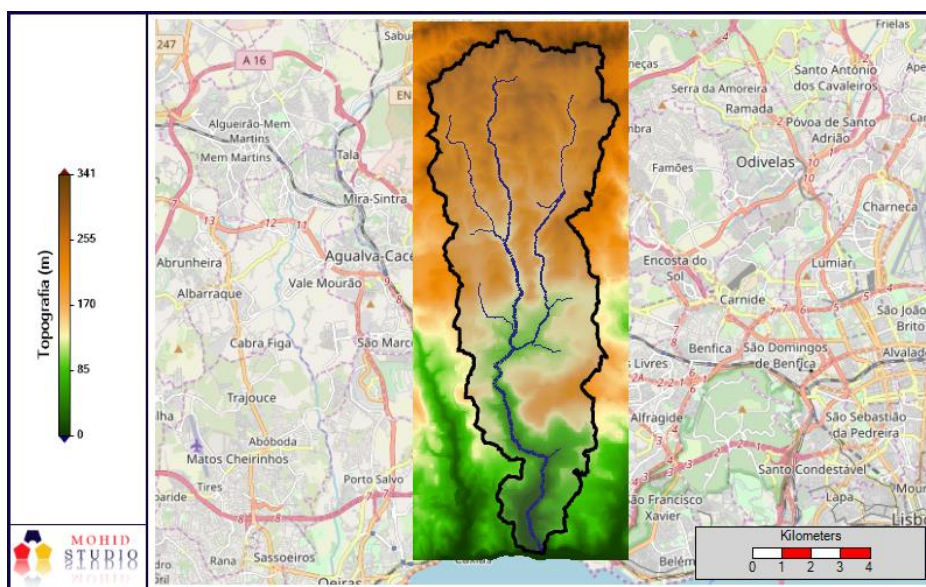


Figura II.6 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica do Rio Jamor.

3.1.2.2. Curve Number

Numa bacia hidrográfica, o escoamento superficial decorrente de um evento de precipitação é influenciado por diversos fatores, nomeadamente a forma da precipitação atmosférica, as características físicas do solo, o uso e ocupação do solo, o estado do solo (seco ou húmido), a resistência do solo face ao escoamento superficial (atrito), a intersecção da precipitação pelas plantas, entre outros (Action Modulers, 2016; APA et al., 2014; MOHID Wiki, 2018).

⁴³ Para cada situação suplementar existente seria necessário realizar estudos de pormenor que tivessem por base uma cartografia à escala adequada (APA et al., 2014; Morais et al., 2019), o que não foi possível, em virtude da limitação de recursos temporários, entre outros.

Nos processos de modelação realizados nesta tese, considerou-se que a intersecção da precipitação pelas plantas é desprezável, sendo, como referido, a conversão da precipitação em escoamento superficial calculada pelo método do *Curve Number*, cujos dados de base consistiam em informação disponibilizada pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Os valores de referência de CN associados à bacia hidrográfica do rio Jamor estão representados na figura II.7, cujos valores mais elevados (tons vermelhos) correspondem às zonas menos permeáveis⁴⁴ da bacia e, por conseguinte, de maior escoamento superficial. Esta *grid data* resultou da aplicação *Toolbox > Grid Data > Construct from Shapefile*, no *MOHID*, após adição do ficheiro do tipo *shapefile* que integrava os valores de CN para a região.

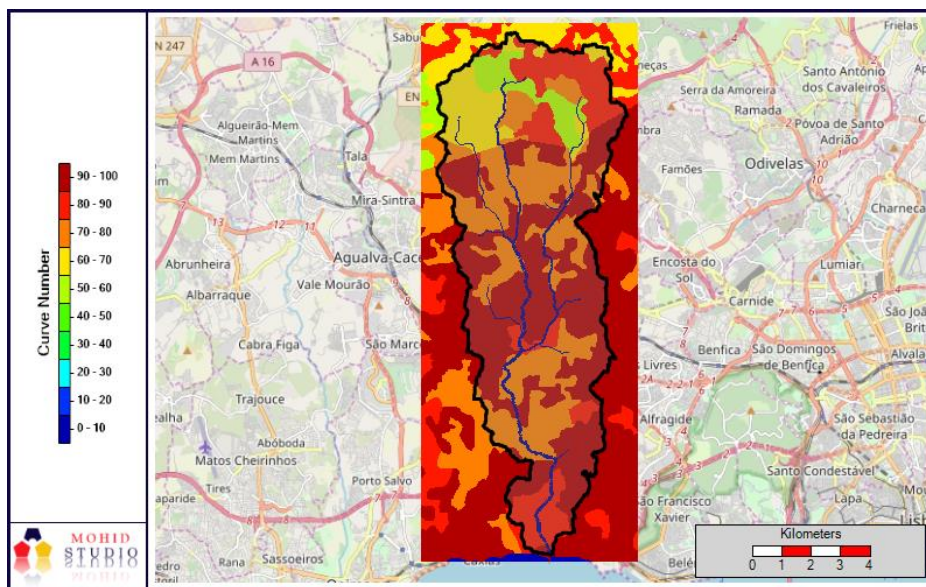


Figura II.7 – Mapa de valores de Curve Number para a bacia hidrográfica do rio Jamor.

3.1.2.3. Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning é um dos índices mais comuns para expressar a rugosidade das superfícies, sendo que a resistência do solo face ao escoamento superficial influencia fortemente a formação das cheias e inundações (APA et al., 2014; Beraza, 2015; MOHID Wiki, 2018).

Os valores do coeficiente de Manning do solo apresentados na figura II.8 foram obtidos através da correlação entre o *Corine Land Cover* 2012 e os valores apresentados em Chow (1959) e Van der Sande et al. (2003), em consonância com o exposto em tabela II.4. Esta *Grid data* resultou da aplicação *Toolbox > Grid Data > Construct from Raster*, no *MOHID*, após adição do ficheiro do tipo *raster* que integrava os valores de coeficiente de Manning para a região, facultado pelo MARETEC aquando o *Workshop “MOHID-Land Training Course”* realizado entre os dias 1 e 4 de outubro de 2018, no Instituto Superior Técnico (IST).

O coeficiente de rugosidade de Manning, para além de expressar a rugosidade da superfície das encostas, é também um fator que influencia a resistência ao escoamento nos canais fluviais. Tendo em conta que o curso de água do rio Jamor é consideravelmente intervencionado, o valor inicial considerado foi de 0,011, baseado nos valores estabelecidos por Chow (1959) para canais construídos ou revestidos de betão.

⁴⁴ Os valores de permeabilidade mais baixos devem-se ao uso e ocupação do solo, tipo de solo ou a conjugação destes dois fatores (APA et al., 2014).

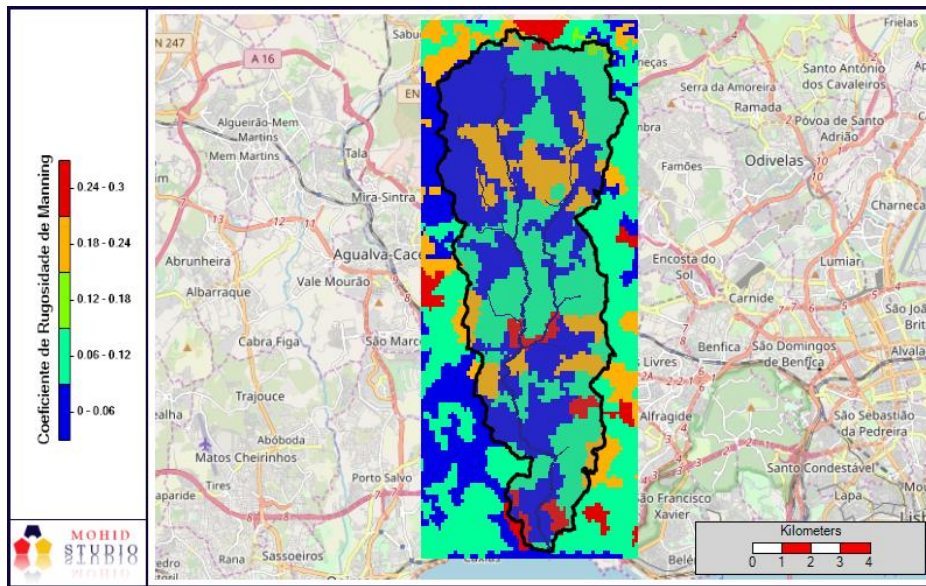


Figura II.8 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia horográfica do rio Jamor.

Tabela II.4 – Coeficientes de Manning adotados em função do uso e ocupação do solo.

Código	Descrição do tipo de ocupação do solo	Coeficiente de Manning
111	Tecido urbano contínuo	0,23
112	Tecido urbano descontínuo	0,115
121	Indústria, comércio e equipamentos gerais	0,23
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	0,038
141	Espaços verdes urbanos	0,259
142	Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas	0,023
211	Culturas temporárias de sequeiro	0,043
231	Pastagens permanentes	0,298
243	Agricultura com espaços naturais e seminaturais	0,058
311	Florestas de folhosas	0,23; 0,058; 0,043
312	Florestas de resinosas	0,127
313	Florestas mistas	0,23; 0,115
322	Matos	0,115; 0,058
324	Florestas abertas, cortes e novas plantações	0,115; 0,058

3.1.2.4. Condições de fronteira

Como referido anteriormente, os processos de modelação realizados no presente estudo são do tipo precipitação-escoamento. Neste sentido, consideraram-se para efeitos de calibração e validação do modelo, os dados de precipitação horária registados na estação de Caneças⁴⁵ (condição de fronteira), cujos valores de caudais simulados foram posteriormente comparados com os observados na Estação Hidrométrica da Senhora da Rocha⁴⁶.

⁴⁵ Optou-se por utilizar as precipitações horárias registadas na estação de Caneças (21B/11UG), dada a sua proximidade com a BHRJ e pelo facto de não existirem, no ano hidrológico de 2010, valores registados nas estações meteorológicas de Belas (21B/09U), Cacém (21B/10G) ou Algés (21B/06G). Para detalhes da localização das estações mencionadas, ver figura II.3 ou II.4.

⁴⁶ Curvas de vazão estão disponibilizadas no site do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), conforme apresentado no Anexo 1.

Saliente-se que foram simulados dois eventos para a calibração (29/10/10 e 30/10/10) e um evento para a validação do modelo (5 e 6/10/10), e que os caudais foram determinados recorrendo às medidas de nível e ao método das curvas de vazão.

Acontece que a altura hidrométrica máxima de aplicação da curva de vazão, H_{\max} , é inferior a parte dos valores de altura hidrométrica instantânea, H_i , registados ao longo do ano hidrológico de 2010 (ver figura II.9), incluindo os dias considerados para calibração e validação do modelo.

Assim, procedeu-se ao cálculo de um novo troço da curva de vazão para valores acima de H_{\max} , ajustando uma regressão de potência à relação entre altura de água e caudal calculado a partir da equação de Manning-Strickler (ver figura II.10). Ou seja, fez-se a extrapolação do caudal para alturas acima do máximo de validade da curva de vazão, aplicando a equação de Manning-Strickler com parâmetros estimados a partir do ajuste ao troço inferior da curva de vazão do SNIRH. Daqui, resultou uma curva com 2 troços: um inferior, correspondente quase à curva de vazão do SNIRH e uma superior, cujos caudais são substancialmente mais baixos, para a mesma altura de água (ver figuras II.10 e II.11).

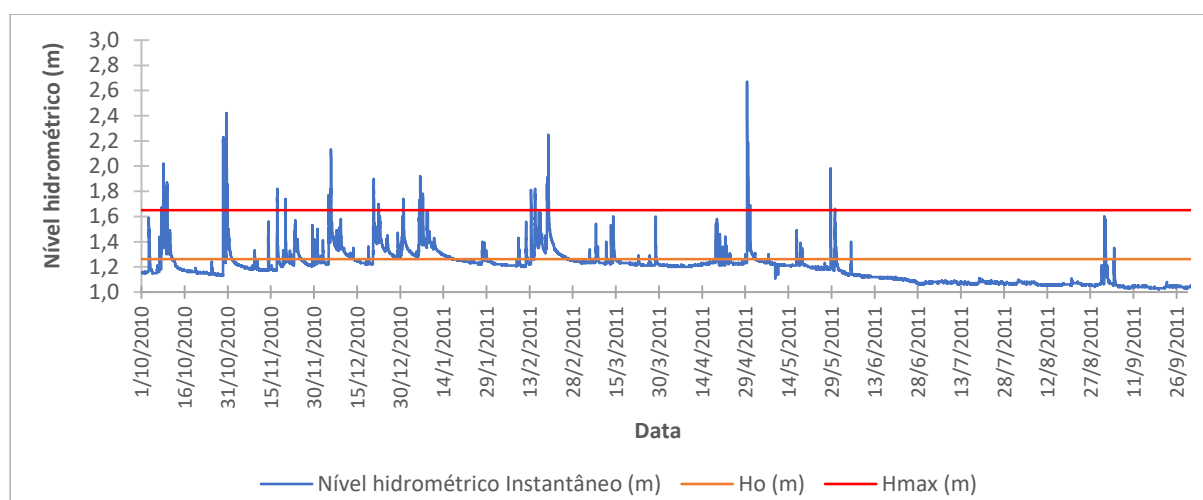


Figura II.9 – Nível hidrométrico instantâneo registado na estação hidrométrica da Senhora da Rocha (azul) no ano hidrológico de 2010 e representação da altura hidrométrica para a qual se anula o caudal (laranja) e altura hidrométrica máxima de aplicação da curva de vazão do SNIRH (vermelho).

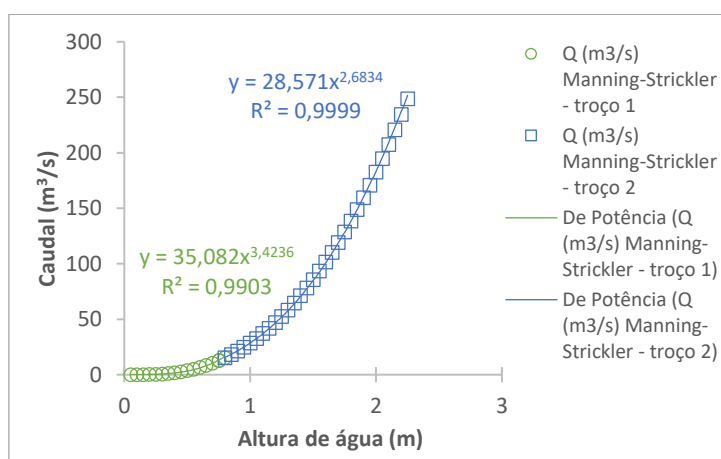


Figura II.10 – Curva de vazão resultante do ajustamento da regressão de potência à relação entre a altura de água e o caudal calculado a partir da equação de Manning-Strickler. Troço 1 da curva de vazão está representado a verde, enquanto que o troço 2 está representado a azul.

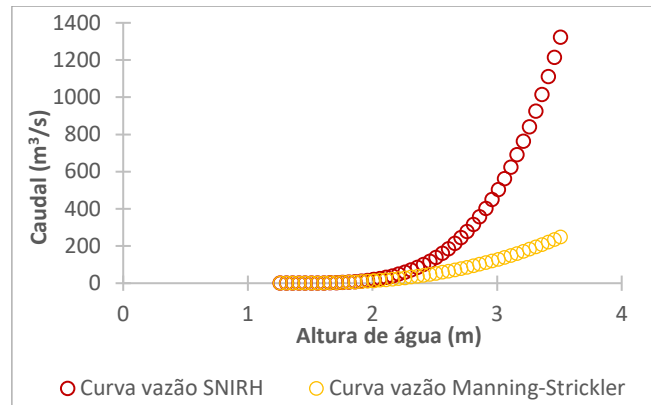


Figura II.11 – Comparação entre o caudal determinado segundo a curva de vazão disponibilizada pelo SNIRH para o ano hidrológico de 2010 (vermelho) e a curva de vazão de Manning-Strickler (laranja).

Em jeito colectivo, apresenta-se a figura II.12 que evidencia os eventos considerados para calibração e validação do modelo, com representação da precipitação e caudal (calculado com base na curva de vazão de Manning-Strickler) observados na estação de Caneças e Senhora da Rocha, respetivamente.

A escolha dos eventos cinge-se ao facto de representarem os maiores extremos de precipitação registados nesse ano hidrológico.

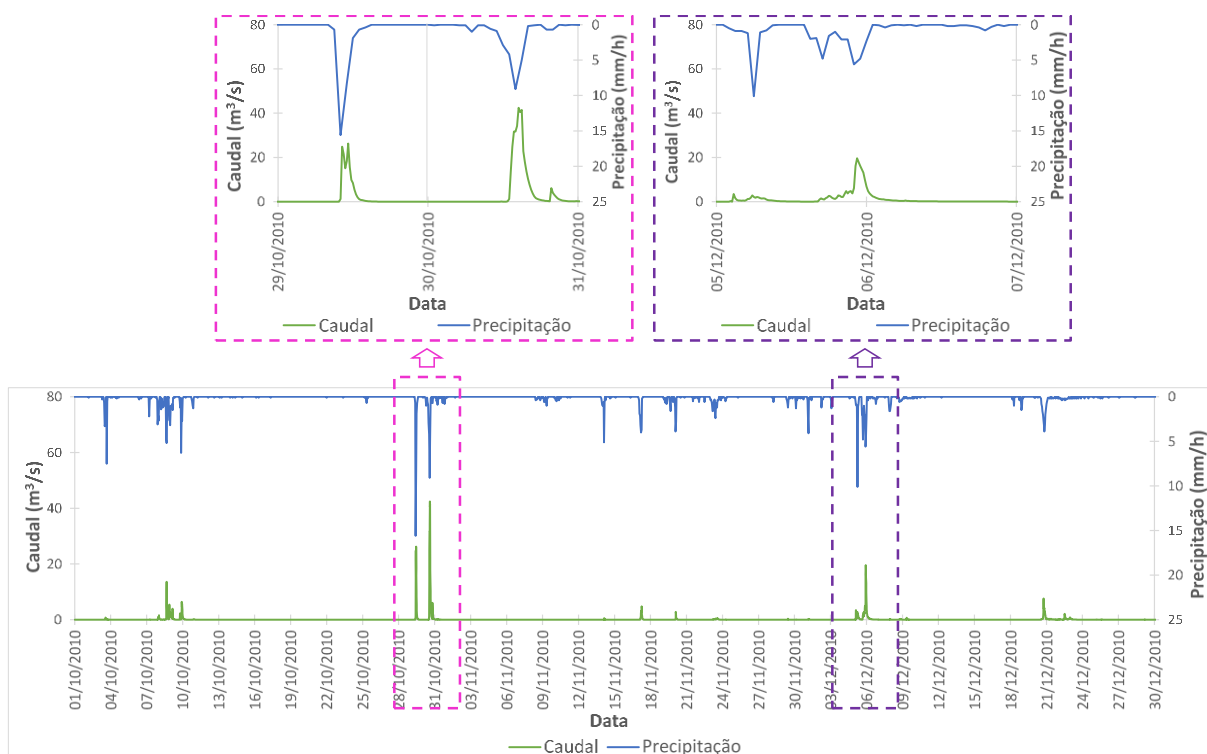


Figura II.12 – Precipitação (azul) utilizada na fase de calibração (rosa tracejado) e validação do modelo (roxo tracejado) com os respectivos caudais observados (verde).

3.1.3. Parametrização do modelo

Quando a bacia hidrográfica é pequena, como no caso da BHRB e BHRJ, o tempo de resposta a um fenómeno de precipitação intensa é relativamente curto, variando entre alguns minutos e algumas horas (Buta et al., 2018). Daí que se tenha definido um modelo bidimensional que considera os módulos do

escoamento superficial e da rede de drenagem, cujas características de escoamento superficial são definidas pelo método do *Curve Number*.

Nesta linha, a parametrização do modelo foi realizada com base nos dados de base adquiridos e nas informações disponíveis no tocante à aplicação de modelos sem estágios de calibração demasiado extensos, à semelhança com o preconizado no PMAACO (ver e.g. Morais et al., 2019; Superlative Numbers, 2019).

Sendo que o CN de uma região depende de um conjunto de fatores, nomeadamente do tipo de solo, grupo hidrológico do solo, uso e ocupação do solo e grau de humidade do solo⁴⁷, fez-se uma análise à precipitação antecedente, i.e, a precipitação acumulada nos 5 dias anteriores ao evento simulado, conforme propõe o método do *Soil Conservation Service* (SCS), tendo-se verificado que no evento do dia 29 de outubro esta é apreciavelmente inferior aos restantes eventos analisados, apresentando uma precipitação antecedente de 1,3 mm, em contraste com os 28,9 e 15,5 mm registados no dia 30 de outubro e 5 de dezembro, respetivamente.

Assim, o grau de humidade do solo é bastante inferior neste caso, constituindo a classe AMC I (*Antecedent Moisture Condition*), ou seja, solos secos (Chow et al., 1988), enquanto que os eventos do dia 30 de outubro e do dia 5 de dezembro se assumem representativos de condições de humidade normais (AMC II).

Com isto em vista, para a calibração do modelo no dia 29 de outubro consideraram-se valores de *Curve Number* inferiores, ajustados de acordo com a equação II.2, de Chow et al. (1988).

$$CN(I) = \frac{4,2 \, CN(II)}{10 - 0,058 \, CN(II)} \quad \text{II. 2}$$

Isto posto, consideraram-se como parâmetros do modelo os dispostos na tabela II.5, que sintetiza a gama de valores iniciais e calibrados, atendendo às duas condições de humidade antecedente do solo.

Tabela II.5 – Valores iniciais e calibrados dos parâmetros utilizados no modelo.

Parâmetro	Valor inicial	Valor Calibrado	Unidades
Coefficiente de Manning da superfície do solo	0,023 a 0,298	≈ 0,018 a 0,238	-
Coefficiente de Manning da rede de drenagem	0,011	0,008	-
Curve Number AMC II (CN II)	58 a 100 ⁴⁸	55,1 a 95	-
Curve Number AMC I (CN I)		≈ 34 a 88,9	-
Largura do canal	4; 7 e 13	2; 3,5 e 7	m
Profundidade do canal	1; 1,1 e 1,5	1,25; 1,5 e 2	m

De referir que após os processos de calibração/validação do modelo, a largura do canal para os diferentes números de Strahler continua a respeitar a abordagem de Veitzer & Gupta (2001), tal como se pode observar na figura II.13. O critério adotado para a secção do canal consiste essencialmente na redução, na ordem dos 50%, da largura, sendo a profundidade ajustada e ampliada de forma a conseguir os melhores resultados.

Relativamente ao coeficiente de Manning da superfície do solo, reduziram-se os valores de base em 20%, enquanto que para o CN reduziram-se os valores de base em 5%.

⁴⁷ A aplicação do método do *Curve Number* considera que, para fins de modelação, a bacia hidrográfica apresenta um AMC II (*Antecedent Moisture Condition*), que constitui essencialmente uma condição de humidade do solo normal (Chow et al., 1988).

⁴⁸ Note-se que as zonas da malha associadas ao mar ou areal, exteriores à bacia, apresentam valores de CN igual a zero.

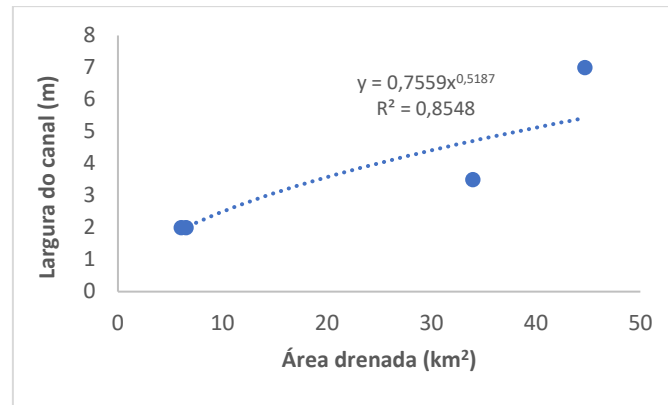


Figura II.13 – Relação entre a área drenada e a largura máxima calibrada do canal, para cada número de Strahler. Valores de modelo calibrado.

3.2. Modelo 3D

3.2.1. Considerações gerais

O modelo 3D foi desenvolvido a título complementar do reforço à abordagem metodológica e modelo hidrológico aplicado no presente estudo, possibilitando a avaliação e comparação dos resultados obtidos mediante modelos de características distintas (2D e 3D).

Este modelo considera as propriedades hidráulicas do solo, cuja informação dos parâmetros de van Genuchten, para todos os IDs identificados, estão discretizados nos 4 horizontes definidos para uma profundidade de 5,0 m de solo, bem como contabilizados os efeitos que as precipitações (e outros dados meteorológicos) têm ao nível do grau de humidade do solo e da vegetação.

A divisão entre a precipitação destinada para infiltração e escoamento superficial fez-se simulando explicitamente as condições do solo recorrendo à equação de Richards e 2D de Saint-Venant. Já o crescimento das plantas é simulado a partir das temperaturas e radiação incidente e a distribuição da evapotranspiração cultural (ET_c) para valores potenciais da evaporação do solo (E_p) e de transpiração das culturas (T_p) é realizada em função do índice de área foliar (LAI).

A tabela II.6 constitui uma síntese das principais características do modelo 3D calibrado e validado, que teve por base a totalidade da bacia hidrográfica do rio Jamor.

Tabela II.6 – Características principais do modelo calibrado e validado na bacia hidrográfica do rio Jamor.

Componente	Descrição
Malha de cálculo	Malha de espaçamento constante
Origem da malha	X: -9,2990 e Y: 38,6920
Tamanho das células	≈ 250x250 m
Nº de células	35 (colunas) x 55 (linhas)
Dados de base do MDT	SRTM reamostrado para 25 metros de resolução, disponibilizado em: https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm/
Módulos utilizados	<i>Atmosphere, Basin, Basin Geometry, Drainage Network, Geometry, Model, Porous Media, RunOff, Vegetation</i>
Condições de fronteira	Precipitação; Velocidade do vento; Radiação solar; Humidade relativa do ar e Temperatura do ar Sem imposição de NM como condição de fronteira a jusante

Seguidamente tecem-se, de forma sucinta⁴⁹, algumas considerações sobre o modelo 3D, especificamente no que respeita aos ficheiros de entrada (inputs) e outros parâmetros considerados no modelo calibrado.

3.2.2. Inputs e outros parâmetros do modelo

3.2.2.1. Modelo digital de terreno

O MDT constitui um ficheiro de entrada fundamental para a realização dos processos de modelação hidrológica, independentemente de se tratar de um modelo 2D ou 3D. Assim, com a utilização do MDT (ficheiro do tipo *raster* disponibilizado no site indicado em tabela II.6, com resolução de 25 m) e os passos metodológicos utilizados no modelo anterior (ver o referente à criação da *grid data* e elementos hidrológicos no subcapítulo II.3.1.2.1), resultou a figura II.14 onde estão representadas a delimitação da bacia hidrográfica (a preto) e as linhas de águas (a azul) geradas a partir do modelo digital de terreno (gradiente de cores).

Importa referir que não foram considerados obstáculos existentes na rede de drenagem que não estivessem já definidas nos dados de base do MDT.

Ao nível da definição da morfologia do canal (altura e larguras superior e inferior), esta foi feita de acordo com o número de *Strahler*, respeitando a abordagem de Veitzer & Gupta (2001), e toma os valores calibrados expostos na tabela II.5 (ou tabela II.11, apresentada no subcapítulo II.4.2.1).

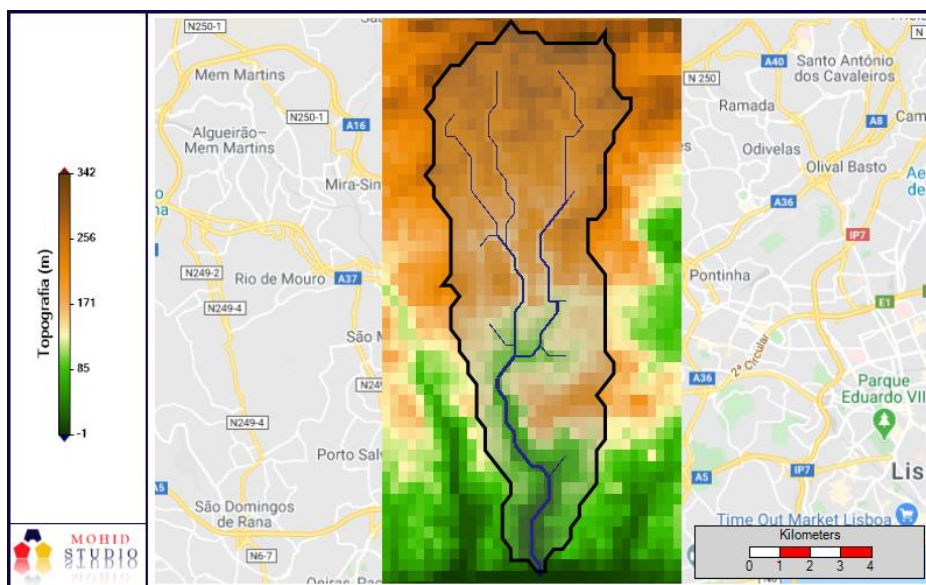


Figura II.14 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica do Rio Jamor.

3.2.2.2. Coeficiente de rugosidade de Manning

Os valores do coeficiente de Manning do solo foram obtidos através da correlação entre o *Corine Land Cover* 2012 e os valores apresentados em Chow (1959) e Van der Sande et al. (2003), e tomam a gama de valores apresentada na tabela II.4 e a distribuição espacial apresentada na figura II.15⁵⁰.

⁴⁹ Na presente dissertação, os resultados relativos à caracterização do regime de inundações na zona crítica da BHRB não tiveram por base as configurações do modelo 3D e sim do modelo 2D. A justificação encontra-se no subcapítulo III.1.

⁵⁰ Esta *grid data* tem por base o procedimento e ficheiro do tipo *raster* descritos no subcapítulo II.3.1.2.3.

Relativamente ao coeficiente de rugosidade de Manning da rede fluvial, o modelo calibrado assume o valor 0,008.

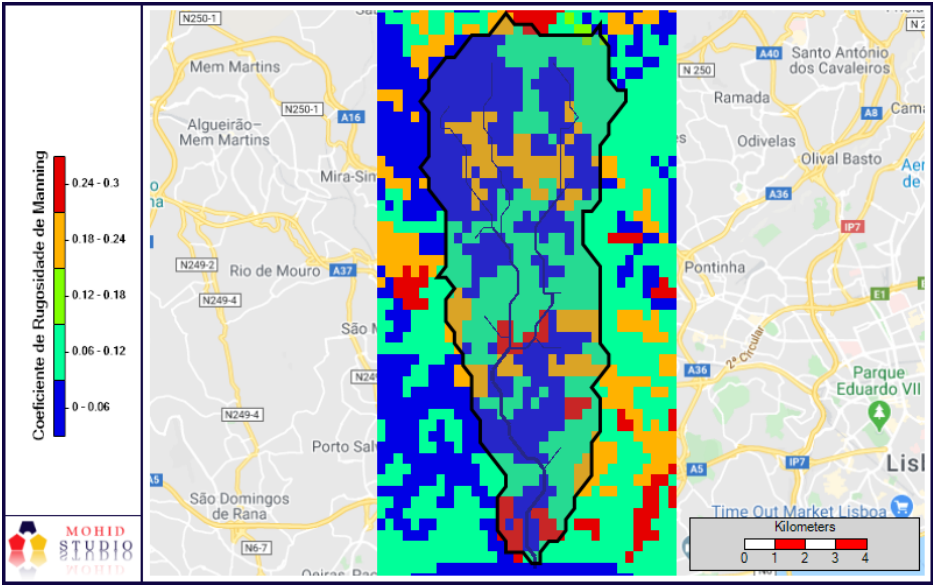


Figura II.15 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia horográfica do rio Jamor.

3.2.2.3. Distribuição vertical do meio poroso

O meio poroso⁵¹ representa-se por uma série de horizontes (ou camadas)⁵², caracterizados por *layers* de determinada espessura⁵³. Neste modelo foram definidos 4 horizontes e 13 *layers*, cujos atributos estão definidos nas figuras II.16 e II.17 e na tabela II.7.

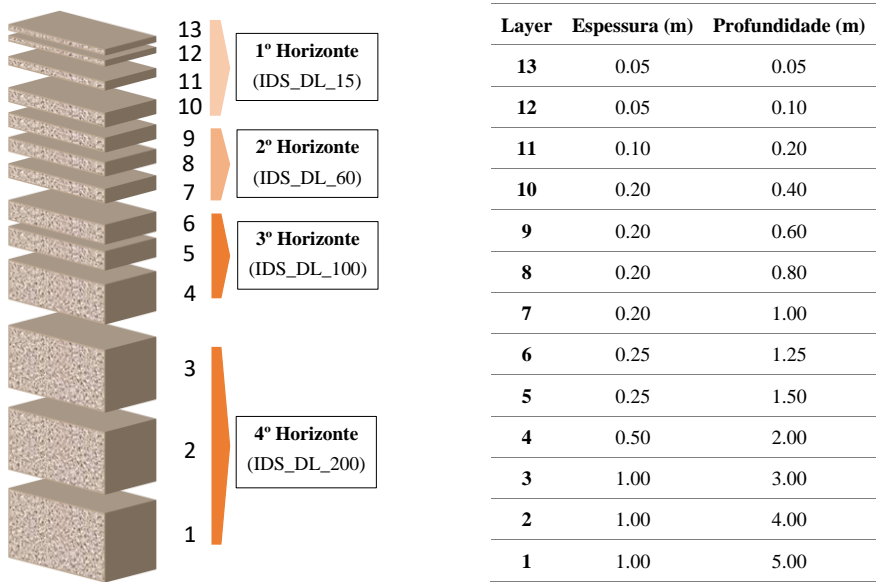


Figura II.16 – Características dos layers e horizontes que definem a discretização vertical do modelo (Fonte: adaptado de MARETEC, 2019).

⁵¹ Para a definição da sua profundidade recorreu-se a *Toolbox > MOHID Land > Porous Media*, na qual foi definida uma espessura máxima de 5,0 m.

⁵² É no módulo *Porous Media* que se definem os horizontes, associam os *layers* que os constituem, se inserem as características do solo (ficheiro com distribuição espacial dos ID's integrantes de cada camada/horizonte definido e respetivos parâmetros de van Genuchten), entre outras configurações de utilizador.

⁵³ É no módulo *Geometry* que se define o número de *layers* e as respetivas espessuras.

Tabela II.7 – Parâmetros de van Genuchten do solo considerados no modelo hidrológico 3D calibrado, para cada horizonte definido e ID identificado.

	ID	k_s		θ_s	θ_r	N	α	L
		(m/s)	(cm/dia)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(-)	(m ⁻¹)	(-)
H4	H1	8	5,647E-06	48,788	0,4646	1,1160	12,840	-5,0
		9	4,100E-07	3,542	0,4912	1,1931	3,470	-4,3
		10 e 11	1,262E-06	10,907	0,4086	1,1335	7,000	-5,0
	H2	16, 17, 18 e 21	3,574E-07	3,088	0,4133	1,1191	2,270	-5,0
		19, 20, 22 e 23	1,073E-06	9,272	0,3839	1,1206	7,170	-5,0
		24	2,481E-07	2,144	0,4322	1,1701	3,360	-5,0

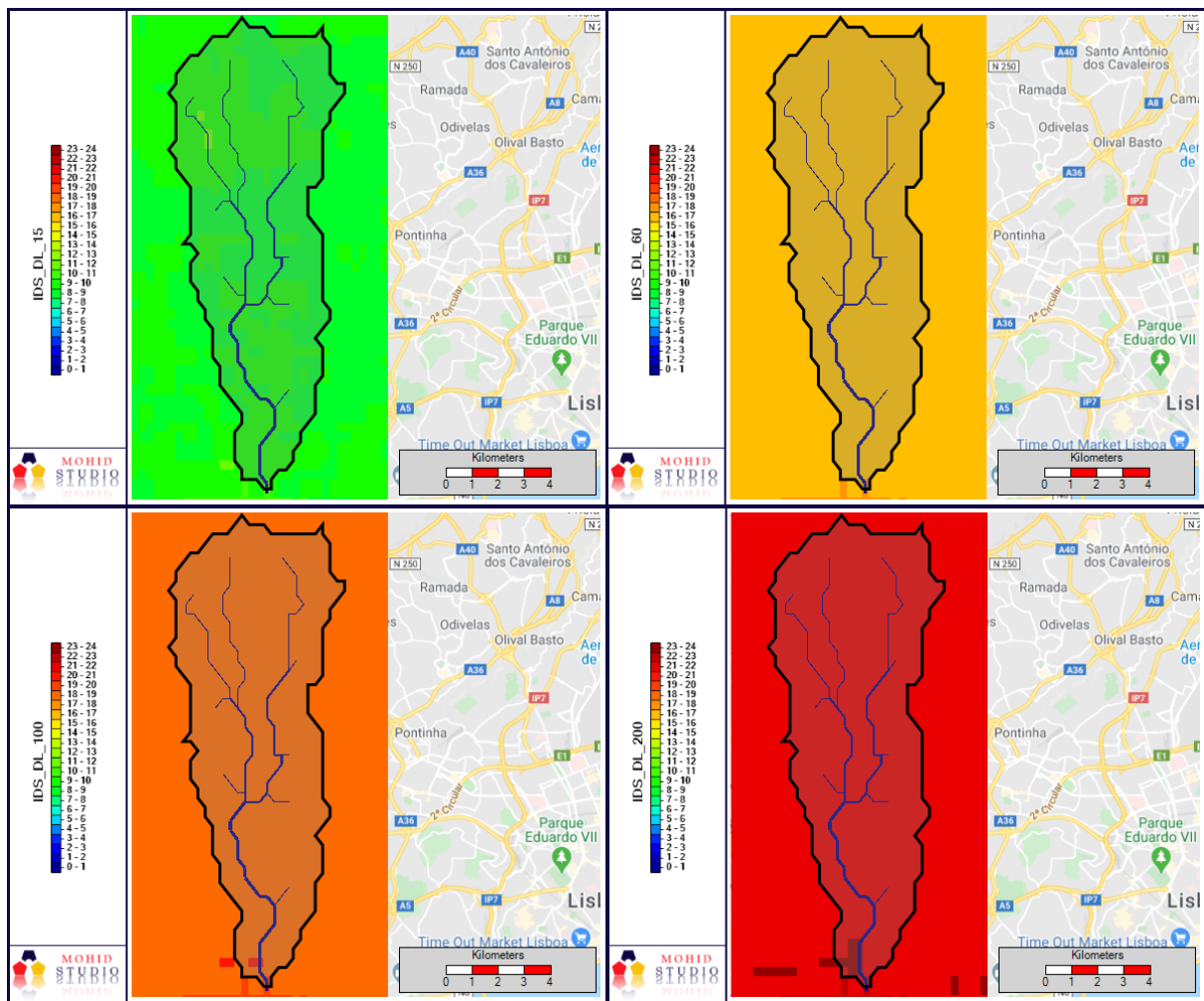


Figura II.17 – Identificação e distribuição espacial dos ID's integrantes de cada camada/horizonte definido.

As informações referentes às propriedades do solo foram obtidas através de um banco de dados europeu disponível no site <https://eusoilhydrogrids.rissac.hu/250.php>⁵⁴ e a ferramenta “MOHID SoilsTool”⁵⁵, munida de um executável (GetSoilProperties.exe) que cria uma *grid data* para cada camada que se pretende definir/usar, com informação dos parâmetros de van Genuchten para todos os ID's identificados.

⁵⁴ Banco de dados 3D hidráulicos do solo da Europa à resolução de 250 m. Para mais detalhes, ver Tóth et al. (2017).

⁵⁵ Ferramenta disponibilizada pelo MARETEC (<https://github.com/anaoliveira>).

Os parâmetros de van Genuchten são a condutividade hidráulica saturada (k_s), o teor de água residual (θ_r), o teor de água em condições saturadas (θ_s), a conectividade/tortuosidade dos poros (L) e os parâmetros de ajustamento empírico α e η , cuja gama de valores calibrados (tabela II.7) constituem os valores de base obtidos mediante o procedimento suprarreferido, com exceção da condutividade hidráulica saturada onde se reduziram os valores para 25%.

O teor inicial de água na capacidade de campo (θ) foi também definido para cada horizonte, e toma o valor de 0,40 nos dois primeiros (acima) e 0,37 nos dois últimos (abaixo).

De referir que enquanto a condutividade hidráulica vertical é estabelecida mediante uma *grid data* que distribui espacialmente os valores de k_s , o fator de condutividade hidráulica horizontal (k_h) é estabelecido para todo o meio poroso, e toma, neste caso, o valor de 1. Este fator multiplicado com o k_s resulta na condutividade horizontal do solo (MOHID Wiki, 2018).

3.2.2.4. Informação agronómica

Neste modelo também são considerados os processos hidrológicos relativos à saída de água no sistema modelado (através da evapotranspiração).

Assim, torna-se necessário conhecer o tipo de vegetação⁵⁶ predominante na bacia hidrográfica do rio Jamor, cuja descrição e distribuição estão apresentadas na tabela II.8 e figura II.18, respetivamente. A construção da *grid data* com a identificação dos diferentes ID's teve por base um ficheiro do tipo *raster* correspondente ao uso do solo da região e a ferramenta *Toolbox > Grid Data > Construct from Raster*, de forma a que fosse interpolada essa informação para cada célula da malha.

As informações relativas à gestão das práticas agrícolas estão vinculadas com três ficheiros/input distintos:

- 1) PARAMETERS_FILE: Relaciona cada ID a um tipo de vegetação, bem como a duração do seu ciclo (data de plantio e colheita). Neste modelo foi definido como dias de plantios o 15 de abril (ID 3, agricultura) e o 3 de outubro (restantes ID's), com colheita na época do verão no caso da agricultura.
- 2) FEDDES_DATABASE: Define os parâmetros de Feddes para cada tipo de vegetação, conforme tabela II.9.
- 3) GROWTH_DATABASE: Discretiza, num banco de dados, os parâmetros utilizados na simulação do crescimento das plantas (ver Anexo 2). Neste modelo foi ativada a opção EVERGREEN para os ID's nº 7, 15, 16 e 94.

Tabela II.8 – Tipos de vegetação e respetivo valor de coeficiente de cultura.

ID	Tipo de vegetação	Kc
0	Sem vegetação	0,50
3	Agrícola	1,05
7	Floresta	1,10
12	Pastagem	1,00
15	Pradaria	1,10
16	Mato	1,10
94	Pinho	1,10

⁵⁶ Importa referir que todos os dados referentes a esta matéria, assim como a definição de opções e configurações do modelo, foram facultados e tiveram a colaboração do MARETEC.

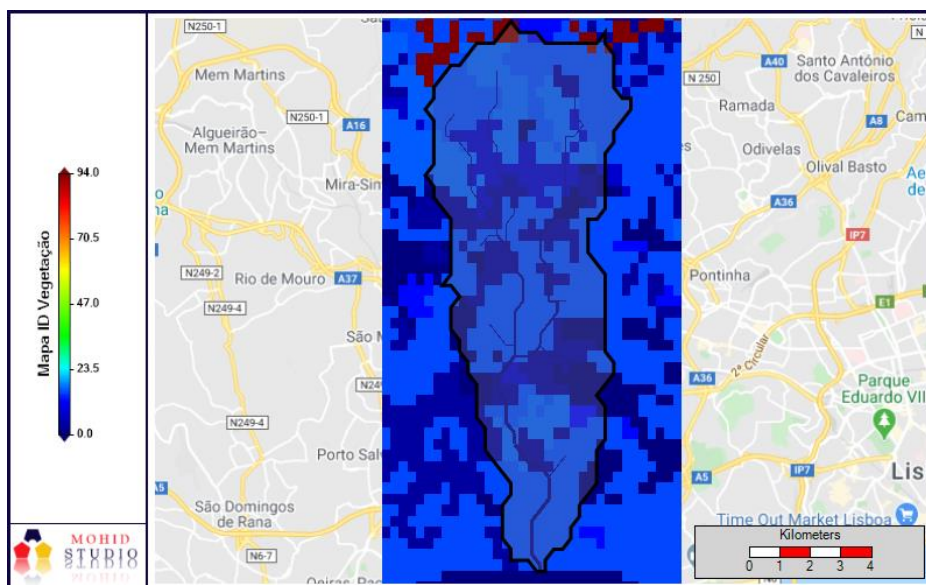


Figura II.18 – Mapa do tipo de vegetação caracterizado na bacia horográfica do rio Jamor.

Tabela II.9 – Valores de sucção de Feddes para cada tipo de vegetação.

ID	Tipo de vegetação	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	h4 (m)
0	Sem vegetação	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Agrícola	0,0	- 0,01	- 7,0	- 30,0
7	Floresta	- 0,1	- 0,25	- 6,0	- 30,0
12	Pastagem	- 0,1	- 0,25	- 6,0	- 30,0
15	Pradaria	- 0,1	- 0,25	- 6,0	- 30,0
16	Mato	- 0,1	- 0,25	- 6,0	- 30,0
94	Pinho	- 0,1	- 0,25	- 6,0	- 30,0

Foi também necessário ajustar os valores do coeficiente de cultura (K_c), de modo a que a evapotranspiração fosse adaptada às práticas agrícolas da BHRJ. A figura II.19 apresenta a distribuição espacial do respetivo coeficiente de cultura (K_c).

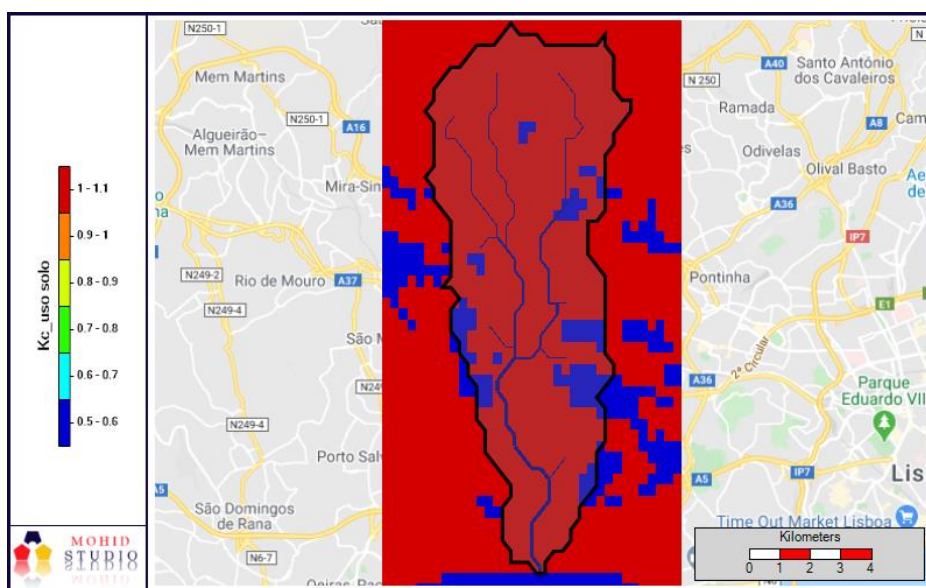


Figura II.19 – Mapa de valores de coeficiente de cultura para a bacia horográfica do rio Jamor.

3.2.2.5. Condições de fronteira

Neste processo de modelação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Jamor consideraram-se como condição de fronteira os seguintes dados meteorológicos:

- Precipitação horária e velocidade do vento registados na Estação Meteorológica de Caneças no período de 1/10/2009 a 30/12/2010 (disponibilizados no SNIRH); e
- Radiação horária, humidade relativa horária e temperatura do ar horária registadas na Estação Meteorológica de São Julião do Tojal no mesmo período (disponibilizados no SNIRH).

Os caudais observados foram determinados recorrendo às medidas de nível e ao método das curvas de vazão, em particular o nível hidrométrico instantâneo registado na Estação Hidrométrica da Senhora da Rocha (dados do SNIRH), no período de 1/10/2010 a 30/12/2010, e a curva de vazão de Manning-Strickler (detalhes no capítulo II.3.1.2.4).

Os eventos considerados para calibração e validação do modelo 3D foram, face aos dados adquiridos e em consonância com o modelo 2D, os dias 29 e 30 de outubro de 2010 (eventos de calibração) e os dias 5 e 6 de dezembro de 2010 (evento de validação).

4. Modelação hidrológica

4.1. Considerações gerais

A modelação hidrológica foi realizada para a totalidade da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, considerando as características do modelo 2D calibrado e validado na bacia do rio Jamor, de forma a obter os caudais afluentes à entrada do modelo hidráulico (Estação Hidrométrica de Laveiras), para os diferentes períodos de retorno (20, 50 e 100 anos), cenários de alterações climáticas (presente, futuro médio prazo e futuro longo prazo) e situações de forçamento oceanográfico.

Correspondendo a uma transposição das configurações do modelo da BHRJ, também neste modelo se consideram os mesmos módulos, configurações e critérios de parametrização. Não obstante, foram considerados apenas os valores de CN associados à situação normal de humidade do solo (AMC II), uma vez que para o cenário futuro de alterações climáticas estão projetados incrementos na frequência e intensidade das precipitações (IPCC, 2014).

A malha computacional de espaçamento constante foi, portanto, definida de modo a que abrangesse toda a bacia da ribeira de Barcarena, cujos detalhes estão apresentados na tabela II.10.

Tabela II.10 – Características do modelo hidrológico aplicado na bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

Componente	Descrição
Malha de cálculo	Malha de espaçamento constante
Origem da malha	X: -9,3317 e Y: 38,6972
Tamanho das células	≈ 20x20 m
Nº de células	380 (colunas) x 660 (linhas)
Dados de base do MDT	Dados disponibilizados pelas CM de Oeiras, Sintra e Amadora Resolução do MDT de base (<i>raster</i>) ≈ 10 m
Módulos utilizados	<i>Atmosphere, Basin, Basin Geometry, Drainage Network, Model, RunOff</i>
Condições de fronteira	Hietogramas de precipitação Fronteira de jusante aberta, com imposição do NM e/ou Sem imposição do NM como condição de fronteira a jusante (ver tabela II.15)

Seguidamente, tecem-se algumas considerações sobre os ficheiros de entrada (*inputs*) utilizados no presente processo de modelação hidrológica.

4.2. Inputs do modelo

4.2.1. Elementos físicos

Sendo este modelo uma adaptação do modelo calibrado e validado para a bacia do Jamor, também aqui se utilizaram os mesmos elementos de base relativos ao MDT, CN e coeficiente de rugosidade de Manning (detalhes no subcapítulo II.3.1.2) e se consideraram os parâmetros e critérios de calibração do modelo (valores apresentados na tabela II.5), ajustados às características da bacia de Barcarena.

Assim, com a utilização do MDT (ficheiro do tipo *raster*, com resolução de 10 m) e os passos metodológicos utilizados no modelo anterior (ver subcapítulo II.3.1.2.1), resultou a *grid data* apresentada na figura II.20, correspondente ao MDT sem depressões (gradiente de cores) e respetiva delimitação da bacia (linha preta) e linhas de água (linha azul) da ribeira de Barcarena.

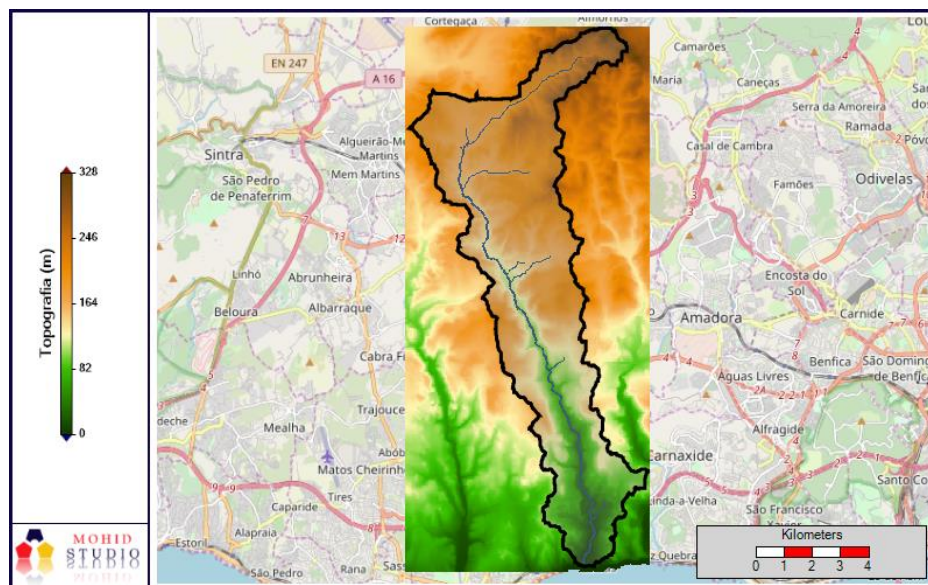


Figura II.20 – Modelo digital de terreno com a delimitação e linhas de água (preto e azul, respetivamente) da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

A nível da morfologia do canal, foram atribuídas as alturas e larguras superiores e inferiores, em metros, dispostas na tabela II.11, que constituem os valores calibrados para a bacia do rio Jamor atendendo a cada número de Strahler.

Tabela II.11 – Características morfológicas da rede de drenagem do modelo hidrológico.

Número de Strahler	Altura	Largura superior	Largura inferior
1 a	1,25	2	2
1 b	1,25	2	2
2	1,5	3,5	3,5
3	2	7	7

No que diz respeito ao *Curve Number* e ao coeficiente de rugosidade de Manning, apresenta-se a figura III.21, cuja gama de valores varia entre 55,1 e 95 e entre $\approx 0,018$ a 0,238, respetivamente.

Quanto ao coeficiente de rugosidade de Manning atribuído à rede de drenagem, este toma o valor de 0,008.

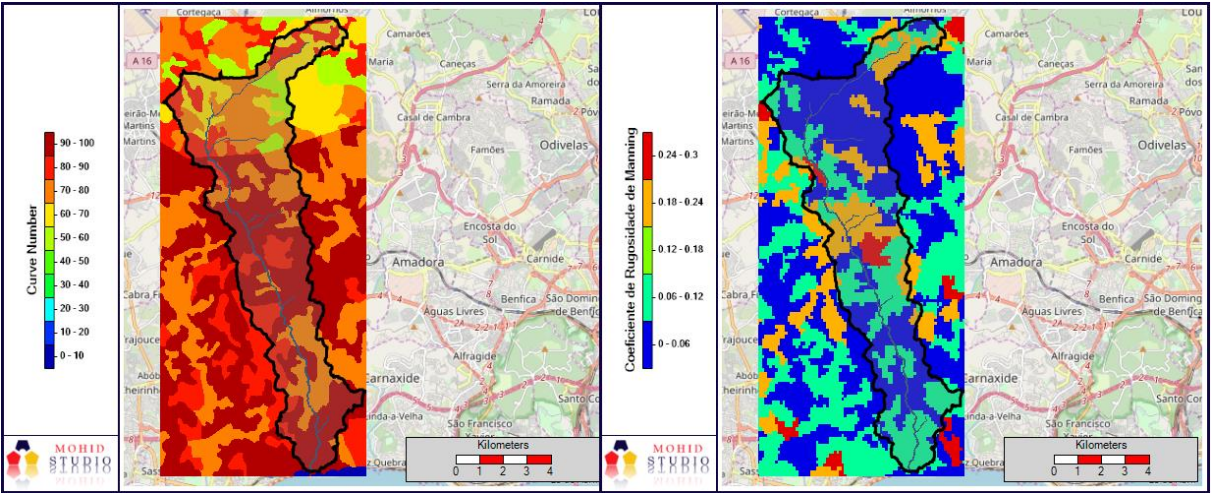


Figura II.21 – Mapa de valores de Curve Number (esquerda) e de coeficiente de rugosidade de Manning do solo (direita) para a bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

4.2.2. Condições de fronteira – situação atual

A ocorrência de cheias e inundações rápidas está associada a eventos de precipitação extrema que ocorrem num curto período de tempo, tornando-se, assim, imprescindível analisar as precipitações que lhes dão origem (Dias, 2016; Leal, 2011).

No presente estudo, para efeitos de modelação hidrológica (e hidráulica), foram utilizados os hietogramas desenvolvidos no âmbito do projeto PMAACO (Dias et al., 2019; Morais et al., 2019), que consistem na distribuição da precipitação diária associada a cada período de retorno, por períodos de tempo de 5 minutos⁵⁷, e cujos procedimentos metodológicos seguem o também descrito em Dias (2016).

De forma sucinta, procedeu-se a uma análise estatística da precipitação diária máxima anual (PDMA) registadas na Estação Meteorológica do Cacém entre os anos hidrológicos de 1979 a 2007, constatando-se que a Log Pearson III representa a lei de extremos que melhor se ajusta á amostra selecionada (portanto, a que melhor caracteriza o fenómeno da precipitação extrema), ajuste esse que passa no teste do qui-quadrado e Kolmogorov Smirnov (Morais et al., 2019). Dessa análise resultou a tabela II.12 que sintetiza a precipitação associada aos períodos de retorno considerados nesta dissertação, com recurso a diferentes leis de extremos.

Tabela II.12 – Períodos de retorno da amostra de precipitação diária máxima anual da Estação Meteorológica do Cacém, considerando diferentes leis de extremos. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019)

Lei de extremos	Período de retorno (anos)		
	20	50	100
Pearson III	109,4	142,5	168,6
Log Pearson III	103,0	138,4	171,7
Gumbel	105,5	126,3	141,9

⁵⁷ A escolha de hietogramas de projeto de blocos alternados de 5 minutos cinge-se ao facto de se estarem a modelar fenómenos de cheias e inundações rápidas numa bacia hidrográfica de pequenas dimensões. No caso de cheias progressivas e de bacias com grandes dimensões, os blocos de tempo do hietograma já são mais espaçados (Dias, 2016).

A discretização temporal da precipitação, para os diferentes períodos de retorno, segue a abordagem de Brandão et al. (2001) para o posto udográfico de Lisboa (IGIDL), recorrendo-se às curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) estimadas para essa estação, ajustadas para os valores estimados de acordo com Portela (2006) (Dias, 2016; Morais et al., 2019).

A escolha da duração dos hietogramas tem subjacente o tempo de concentração da bacia hidrográfica, uma vez que é necessário garantir que o bloco com maior precipitação seja devidamente modelado desde a cabeceira do curso de água até à foz, pois só deste modo é possível modelar adequadamente a extensão máxima da inundação (Dias, 2016; Morais et al., 2019).

Ainda que o tempo de concentração da BHRB seja de aproximadamente 7 horas, e que hietogramas de maior duração impliquem um maior tempo de processamento do modelo, foram aqui considerados hietogramas com duração de 24h (ver figura II.22), em virtude do que foi referido precedentemente. Outra justificação cinge-se à necessidade do modelo em atingir o equilíbrio antes de se registar o pico de cheia, uma vez que quando se dá início a uma simulação sem água no canal a simulação leva algum tempo a ter vazão em toda a linha de água.

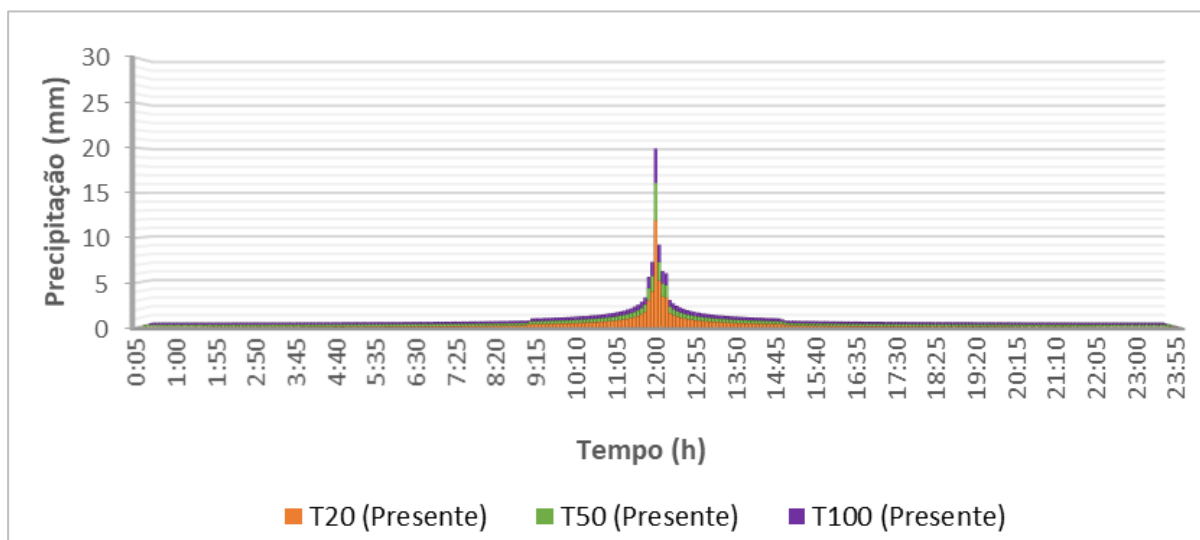


Figura II.22 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados com base em dados observados para a estação meteorológica do Cacém entre os anos hidrológicos de 1979 a 2007. (Fonte: adaptado de Morais et al., 2019)

Face aos objetivos estipulados para a presente dissertação, e de forma a analisar os efeitos do forçamento oceanográfico na foz da ribeira de Barcarena, os processos de modelação hidrológica (e hidráulica) foram realizados com imposição do nível do mar (NM) como condição de fronteira de jusante.

Esta análise considerou duas situações: o NMM⁵⁸ registado em 2014, que de acordo com Antunes (2016) se encontrava 0,181 metros acima do NMM1938 (detalhes no subcapítulo I.1.2.2); e os valores extremos associados ao período de retorno de 50 anos alcançados pelo nível do mar (NM_{max}), incorporando as componentes de maré e sobre-elevação, que de acordo com Andrade et al., (2006) e o indicado no PMAACO (Dias et al., 2019; Taborda et al., 2019), corresponde a 2,22m.

No presente estudo, em conformidade com Andrade et al., (2006), assumiu-se a não existência de longo termo da sobre-elevação meteorológica, e como tal, a alteração do nível máximo do mar em cenários futuros dependerá unicamente da subida do NMM (Taborda et al., 2019).

⁵⁸ Apesar de um nível do mar mais alto (e.g. preia-mar) potenciar a inundação junto à foz da linha de água - já que a água terá mais dificuldade de escoar para o mar - estatisticamente, é tão provável que o pico de cheia coincida com a preia-mar como com a baixa-mar, justificando-se assim a imposição do NMM como condição de fronteira (Andrade et al., 2006; Dias et al., 2019).

De referir que também foram simuladas cheias e inundações sem a imposição do NM como condição de fronteira de jusante, de forma a quantificar o contributo das precipitações nestes processos hidrológicos.

4.2.3. Condições de fronteira – situação futura

Para uma análise prospetiva das cheias e inundações rápidas, foram impostos como condição de fronteira os hietogramas de projeto desenvolvidos no âmbito do projeto PMAACO (Morais et al., 2019) para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados para os períodos de médio (2041-2070) e longo prazo (2071-2100), para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5 (ver figuras II.23 e II.24).

Em concordância com a análise em cenário histórico, foram desenvolvidos hietogramas com uma duração de 24 horas divididos em blocos alternados de 5 minutos.

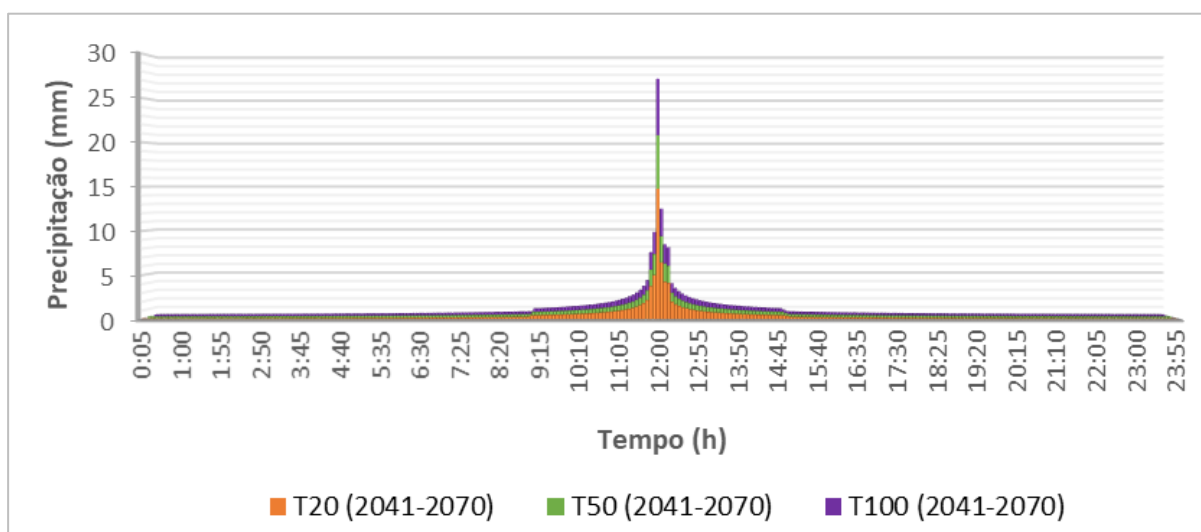


Figura II.23 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados para os períodos de médio prazo (2041-2070), para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Moraes et al., 2019)

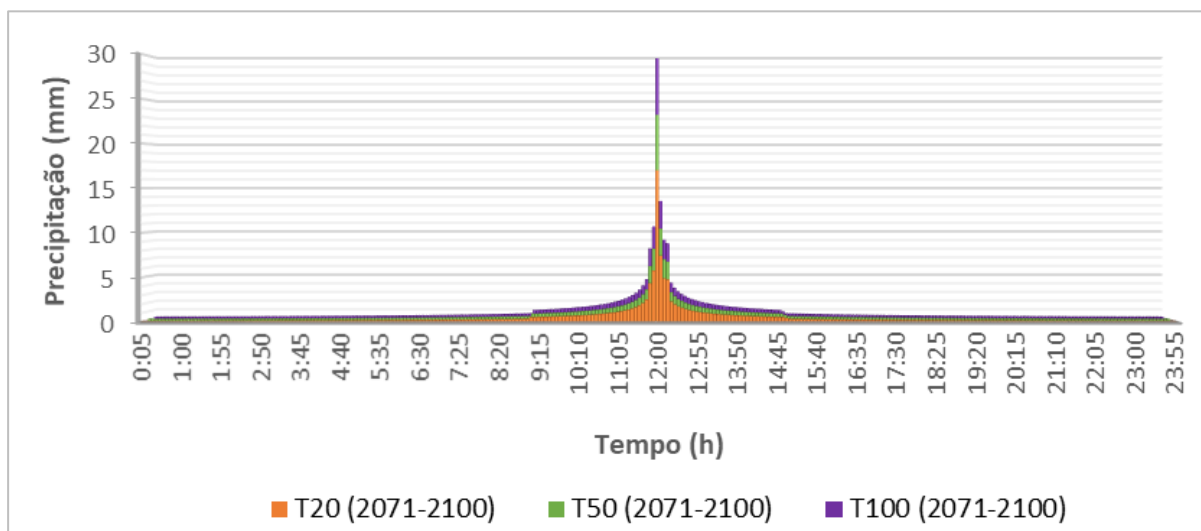


Figura II.24 – Hietogramas de projeto para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos calculados para os períodos de longo prazo (2071-2100), para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Moraes et al., 2019)

Os passos metodológicos para a sua produção estão descritos no PMAACO (Morais et al., 2019) e Dias (2016). No entanto, e de forma sucinta, importa aqui referir que a precipitação em cenários futuros de alterações climáticas é procedente de uma correção de viés aos modelos considerados – pelo método de perturbações por quantis (Willems & Vrac, 2011) – tendo em atenção a série histórica de precipitações da estação meteorológica do Cacém (Dias, 2016; Moraes et al., 2019). Desta forma é possível analisar os eventos extremos de precipitação atuais comparativamente aos valores projetados pelo cenário RCP8.5 (Dias, 2016; Moraes et al., 2019).

Para a obtenção dos períodos de retorno, seguiram-se os procedimentos adotados aquando o seu cálculo a partir dos dados de PDMA observados entre os anos hidrológicos de 1979 a 2007, aplicando-se as diferentes leis de extremos (Pearson III, Log Pearson III e Gumbel) e selecionando-se em cada situação aquela que apresentou melhor ajuste.

Dessa análise resultou a tabela II.13 que sintetiza a precipitação associada aos períodos de retorno considerados nesta dissertação, com recurso a diferentes leis de extremos, bem como a alteração projetada para os eventos extremos de precipitação a médio (2041 – 2070) e longo prazo (2071 – 2100).

Tabela II.13 – Períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, associados à precipitação máxima diária anual da estação meteorológica do Cacém para o histórico observado (1979-2007) e valores projetados a médio (2041-2070) e longo prazo (2071-2100), obtidos através da mediana de nove modelos climáticos, para os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5. (Fonte: adaptado de Moraes et al., 2019)

		1979-2007 Histórico	2041-2070 RCP8.5	2071-2100 RCP8.5
Períodos de retorno	20	mm	103,0	127,5
		Alteração em %	-	23,7
	50	mm	138,4	179,3
		Alteração em %	-	29,6
	100	mm	171,7	235,1
		Alteração em %	-	37,0

Para a obtenção dos hietogramas de projeto apresentados nas figuras II.23 e II.24, seguiram-se os procedimentos que foram aplicados para a amostra de dados observados (Dias, 2016; Moraes et al., 2019).

Para analisar a resposta das alterações climáticas na interface rio-mar, a nível de inundações, considerando os períodos de médio e longo prazo em cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5, recorreu-se aos valores utilizados na situação atual, aditando as projeções de subida do NMGM reportadas no quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (ver figura I.4b). Este relatório indica uma subida variável entre 0,22 e 0,38 m no intervalo 2046-2065, face a 1986-2005, e variável entre 0,52 e 0,98 m no ano 2100 (IPCC, 2014, 2013). No presente estudo, foram aplicados os valores mais elevados por constituírem uma situação mais desfavorável.

5. Modelação hidráulica

5.1. Considerações gerais

A modelação hidráulica da zona crítica da BHRB tem por objetivos estimar as características da propagação da onda de cheia e produzir uma cartografia de áreas inundáveis, profundidade máxima de inundação e níveis de perigosidade associados aos diferentes períodos de retorno, cenários de alterações

climáticas (presente, futuro médio prazo e futuro longo prazo) e situações de forçamento oceanográfico, tendo por base um modelo bidimensional de alta resolução.

Neste processo, considerou-se o módulo do escoamento superficial e os caudais afluentes obtidos no modelo anterior (que foram impostos como condições de fronteira de montante, num ponto específico da rede de drenagem, correspondente à estação de Laveiras, e cujos hidrogramas estão apresentados em Anexo 3), sendo os escoamentos nas planícies de inundação calculados pelas equações 2D de Saint-Venant.

Para uma adequada simulação de cheias e inundações, definiu-se uma malha computacional de alta resolução (ver tabela II.14, que constitui uma síntese das principais características do modelo hidráulico aplicado na bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, em particular na zona que se encontra a jusante da Estação Hidrométrica de Laveiras), de forma a descrever com o maior rigor possível a zona a simular⁵⁹ (Action Modulers, 2016; APA et al., 2014).

Tabela II.14 – Características principais do modelo hidráulico aplicado na zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

Componente	Descrição
Malha de cálculo	Malha de espaçamento constante
Origem da malha	X: -9,2853 e Y: 38,6985
Tamanho das células	≈ 5x5 m
Nº de células	196 (colunas) x 385 (linhas)
Dados de base do MDT	Dados disponibilizados pela CM de Oeiras Resolução do MDT de base (<i>raster</i>) ≈ 5 m
Módulos utilizados	<i>Atmosphere, Basin, Basin Geometry, Discharge, Model, RunOff</i>
Condições de fronteira	Hietogramas de precipitação Fronteira inicial com caudais afluentes obtidos na modelação hidrológica Fronteira de jusante aberta, com imposição do NM e/ou Sem imposição do NM como condição de fronteira a jusante (ver tabela II.15)

Seguidamente, tecem-se alguns comentários sobre os ficheiros de entrada (*inputs*) utilizados no processo de modelação hidráulica.

5.2. Inputs do modelo

5.2.1. Modelo digital de terreno

Sendo as cheias e inundações fortemente condicionadas pelas condições topográficas da região (APA et al., 2014), o modelo requer um MDT de alta resolução, de forma a gerar malhas computacionais com o detalhe necessário à concretização dos objetivos pretendidos.

Assim, criou-se um novo MDT que teve por base os dados topográficos vetoriais disponibilizados pela Câmara Municipal de Oeiras e os processos metodológicos descritos no subcapítulo II.3.1.2.1, com a particularidade de ser definida uma resolução de 5 metros, ao invés de 10m. Posteriormente, tendo esse ficheiro do tipo *raster* adicionado ao *MOHID*, repetiram-se todos os procedimentos até à obtenção da *grid data* correspondente ao MDT sem depressões. Como seria de esperar, essa *grid data* tem espaçamento constante e forma retangular.

⁵⁹ Ter presente que malhas de maior resolução requerem tempos de computação mais elevados.

Acontece que quanto maior a resolução, maior é o número de interações a realizar e, consequentemente, maior o tempo de computação (Action Modulers, 2016). Desta forma, para restringir o tempo de cálculo ao estritamente necessário, criou-se uma nova *grid data* que contenha apenas a informação relativa à bacia (excluindo as partes adjacentes), tal como se pode ver na figura II.25.



Figura II.25 – Modelo digital do terreno correspondente à zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

Para o efeito, converteu-se primeiramente o ficheiro XML correspondente à delimitação da BHRB (linha preta da figura II.20) num ficheiro do tipo *Shapefile* (*Toolbox > File Conversion > XML Geometry to ESRI Shapefile*).

Depois, no ArcGIS, fez-se um buffer de 10 m, de forma a obter as áreas que ficam a menos de 10 metros da BHRB (*ArcToolbox > Analysis Tools > Proximity > Buffer*).

Este procedimento serviu de base à criação de um polígono na qual seria extraída a área referente a esse buffer, resultando, assim, um polígono retangular com um “buraco” (depois de criar uma *shapefile* do tipo polígono e desenhar um polígono de forma retangular, usou-se a ferramenta *ArcToolbox > Analysis Tools > Erase*).

Este ficheiro foi posteriormente adicionado no *MOHID*, e serviu de base à edição da *grid data* correspondente ao MDT sem depressões (*Toolsbox > Grid Data > Edit Grid Data*), onde se escolheu a opção de criar uma nova seleção de dados que intersectasse os dois ficheiros, e à qual se aplicou a operação “*Close points*”, sendo desta forma excluídas as células exteriores à bacia.

5.2.2. Curve Number

Como referido anteriormente, pela aplicação do método do *Curve Number* é possível quantificar a precipitação que se destina ao escoamento superficial, sendo o valor de CN dependente do tipo e uso/ocupação do solo, entre outros (Action Modulers, 2016; MOHID Wiki, 2018; Zhang et al., 2019).

Para a obtenção da *grid data* referente ao CN da malha computacional definida, consideraram-se os mesmo dados de base e passos metodológicos que no modelo hidrológico. No entanto, e de forma análoga ao MDT, utilizou-se a ferramenta *Toolsbox > Grid Data > Edit Grid Data* e o ficheiro do polígono correspondente à área exterior ao buffer da bacia, de forma a obter o mapa apresentado na figura II.26.

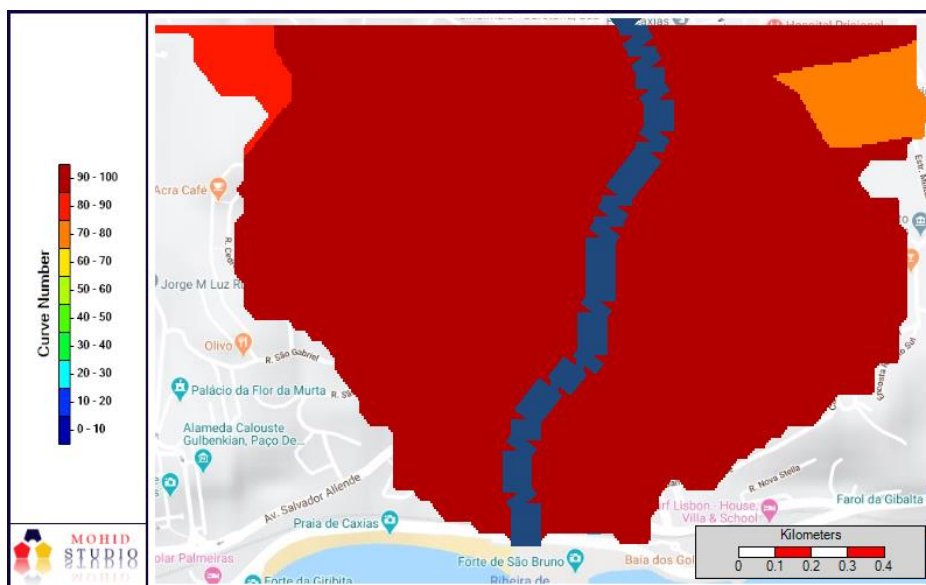


Figura II.26 – Mapa de valores de Curve Number correspondente à parte jusante da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

5.2.3. Coeficiente de rugosidade de Manning

Ao coeficiente de rugosidade de Manning coliga-se a rugosidade das superfícies, seja ela ao nível do escoamento superficial como de canais (APA et al., 2014; Beraza, 2015; MOHID Wiki, 2018).

Para a atribuição do valor de coeficiente de Manning do solo a cada célula da malha computacional, seguiram-se os procedimentos aplicados no modelo hidrológico. Posteriormente, e à semelhança dos *inputs* precedentes, editou-se a *grid data* com a operação “Close points”, resultando no mapa apresentado na figura II.27.

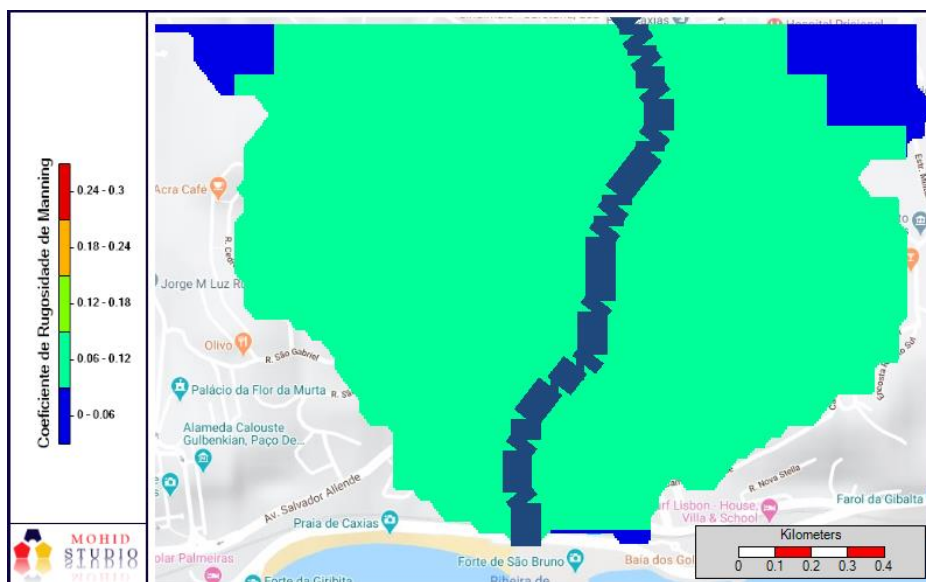


Figura II.27 – Mapa do Coeficiente de rugosidade de Manning correspondente à parte jusante da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

Como o modelo hidráulico não considera o módulo da rede de drenagem, não foi atribuído nenhum coeficiente de rugosidade de Manning às superfícies dos canais.

5.2.4. Condições de fronteira – situação atual e futura

As condições de fronteira impostas no modelo hidráulico foram as relativas à precipitação, nível do mar e caudais afluentes à estação de Laveiras.

No que concerne aos dados de precipitação e de forçamento oceanográfico, aplicaram-se os mesmos que na modelação hidrológica (BHRB), para os diferentes períodos de retorno (20, 50 e 100 anos) e cenários de alterações climáticas considerados (presente, futuro médio prazo e futuro longo prazo).

Os caudais afluentes obtiveram-se por modelação hidrológica, mediante a definição do nó da rede de drenagem onde se pretendia adquirir o *output* ou *timeserie* da simulação (*Toolbox > Time Series > Node Timeseries*).

Tendo esse *timeserie*, procedeu-se à identificação da célula computacional de entrada onde se pretendia implementar as descargas no modelo hidráulico, aquando a configuração do módulo *Discharge*.

Na figura II.28, pode-se observar a ligação entre o modelo hidráulico e hidrológico, onde é possível identificar a delimitação da bacia hidrográfica (linha preta), as linhas de águas geradas a partir do MDT (linhas azuis), os vários nós onde se obtiveram os *outputs* das simulações com o modelo hidrológico (indicadores azuis), o modelo digital do terreno do modelo hidráulico (gradiente de cores) e o nó onde foi considerado o afluente do modelo hidrológico no modelo hidráulico (indicador azul da caixa laranja).

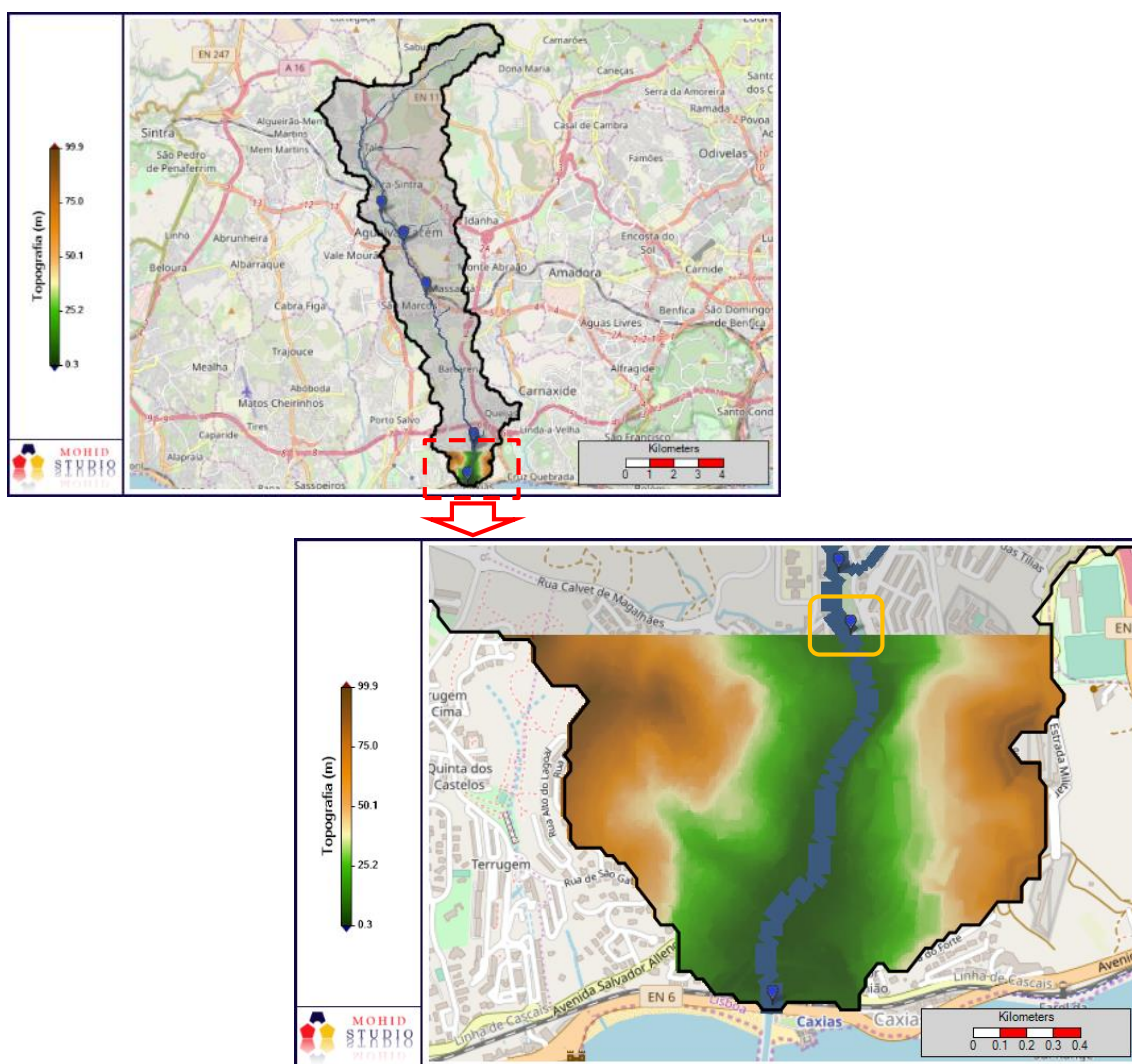


Figura II.28 – Ligação entre o modelo hidrológico (acima) e hidráulico (abaixo), com identificação do nó onde foi considerado o afluente do modelo hidrológico no modelo hidráulico (indicador azul da caixa laranja).

6. Atributos da análise de resultados – cenários e outras considerações

Através dos processos de modelação descritos (modelos 2D) foi possível a caracterização do regime de inundação da zona crítica da BHRB mediante dois grandes grupos de resultados que diferem entre si nos cenários considerados para análise, em prol dos objetivos específicos enumerados.

Na elaboração da cartografia de zonas inundáveis (detalhes no subcapítulo III.2.2) foram apreciados os efeitos conjuntos das precipitações extremas e forçamento oceanográfico, considerando os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos e a situação normal e de tempestade no meio marítimo, para o presente e para os períodos de médio (2041-2070) e longo prazo (2071-2100), que têm por base os cenários de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5.

Contudo, para a avaliação ou quantificação dos contributos individuais dos processos promotores de inundação referidos (detalhes no subcapítulo III.2.1), procederam-se a algumas simulações suplementares, dos quais fazem parte a não imposição de um nível do mar como condição de fronteira a jusante (sendo, no entanto, o modelo configurado com a opção “*Critical Depth*”⁶⁰, CD), bem como a imposição de um valor de NM constante e igual a 3,20 m (valor projetado como alcance do mar em situação de tempestade, para o final do século), em conformidade com a tabela II.15. Saliente-se que nestas simulações analisam-se os períodos de retorno considerados neste estudo.

De referir também que para se fazer uma análise dos efeitos do forçamento oceanográfico extremo nas cheias e inundações em cenários de longo prazo, teria de se seleccionar um valor de NM superior a 3,20 m, o que constituiria um valor bastante extremado de NM para o cenário presente e de médio prazo, com uma probabilidade de ocorrência substancialmente reduzida. Face à limitação de recursos temporais, não foi possível fazer um estudo tão aprofundado, para além disso, o valor extremado de NM para a situação presente e de médio prazo foi já estudado a título de curiosidade e para fins de uma melhor apresentação visual de resultados.

Tabela II.15 – Definição das condições de fronteira de jusante utilizadas nos processos de modelação da zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena.

Forçamento oceanográfico		Cenário		
		Presente	Médio prazo (41-70)	Longo prazo (71-100)
Nulo	CD	✓	✓	✓
Normal	NMM	0,18 m	0,56 m	1,16 m
Tempestade	NM_{max}	2,22 m	2,60 m	3,20 m
Extremo	NM	3,20 m	3,20 m	-

Relativamente à avaliação da perigosidade das cheias e inundações, o presente estudo segue o preconizado pela Comissão Nacional da Gestão de Riscos de Inundação (CNGRI), cujas classes estão definidas de acordo com a tabela II.16.

Segundo a metodologia da CNGRI, a perigosidade é determinada em função da profundidade (HC) e velocidade do escoamento (Ve), podendo ser expressa através da equação II.3, com HC em [m] e Ve em [m/s]:

$$P = HC \times (Ve + 0,5) \quad \text{II. 3}$$

⁶⁰ O escoamento deixa a última célula sob regime crítico, onde o caudal (Q) é igual à área do nó a montante (A) multiplicada pela raiz quadrada da multiplicação da aceleração da gravidade (g) com a altura da coluna de água (H_a).

Saliente-se que a perigosidade hidrodinâmica representa o perigo associado a um evento de cheia e inundação com determinada magnitude, refletindo a sua severidade e capacidade de causar danos efetivos (APA et al., 2014).

Tabela II.16 – Perigosidade hidrodinâmica da inundação. (Fonte: Adaptado de APA et al., 2014)

Classe de valores	Perigosidade	Descrição do risco (considerado apenas a população)
< 0,75	Inexistente	-
0,75 a 1,25	Baixa	Cautela
1,25 a 2,5	Média	Perigo para algumas pessoas
2,5 a 7	Alta	Perigo para a maior parte das pessoas
> 7,0	Muito Alta	Perigo para toda a população

Capítulo III - Resultados e discussão

1. Calibração e validação: Avaliação e análise do modelo

Concluídos os trabalhos concernentes à implementação do modelo, seguem-se os processos de calibração e validação, que têm por base o ajustamento dos parâmetros mencionados na tabela II.5 e os eventos de precipitação observados nos dias 29 e 30 de outubro (calibração) e nos dias 5 e 6 de dezembro (validação) de 2010.

O desempenho do modelo foi avaliado por aplicação de dois métodos: comparação visual entre os dados de caudal simulados e observados, e utilização de indicadores estatísticos, que se encontram detalhados no subcapítulo I.2.3.1.

Numa primeira fase, procedeu-se à simulação dos processos precipitação/escoamento considerando as configurações de referência ou de base (detalhes no subcapítulo II.3.1.2), comprovando-se a necessidade de calibrar o modelo em face aos resultados obtidos.

Este procedimento envolveu a otimização dos parâmetros por tentativa e erro até minimizar a diferença entre os valores de caudais simulados e observados, nos três eventos de precipitação selecionados. Destes ajustes, resulta a gama de valores calibrados listado na tabela II.5, cuja comparação entre os caudais é possível mediante visualização da figura III.1.

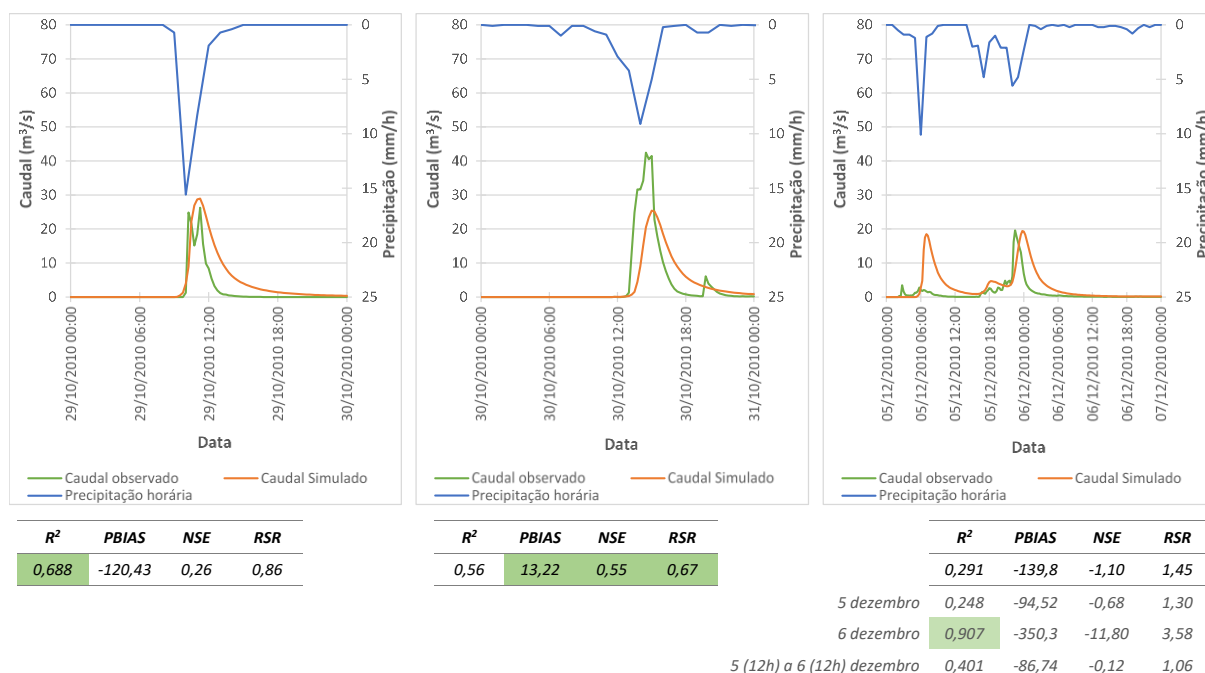


Figura III.1 – Comparação entre os caudais simulados (laranja) e observados (verde), com representação da precipitação observada (azul) nos três períodos simulados, considerando as configurações de modelo calibrado. Em tabelas constam os resultados da análise estatística (eventos para calibração do modelo à esquerda e centro e para validação à direita), estando a sombreado de cor verde os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.

Como se pode observar, os melhores resultados a nível estatístico, considerando o período simulado, foram os referentes ao evento de precipitação do dia 30 de outubro, apresentando índices classificados como satisfatórios.

Contudo, é nos restantes eventos que se verifica uma maior aproximação visual, em especial no dia 29 de outubro, caracterizado por configurações de solo seco, onde os caudais simulados apresentam um máximo comparativamente próximo ao observado na estação da Senhora da Rocha.

No evento selecionado para validação do modelo, os caudais obtidos no segundo pico de precipitação (das 12h do dia 5 às 12h do dia 6 de dezembro) estão, também, relativamente próximos dos observados, ainda que apresentando uma incidência temporal aparentemente tardia.

Neste sentido, e a título complementar, procedeu-se a uma análise considerando uma ocorrência antecipada da precipitação registada na estação meteorológica de Caneças em 1h, com a premissa de que um evento de pluviosidade não se dá no mesmo momento em dois locais diferentes, distanciados entre si, e atendendo ao facto de que a velocidade típica de uma tempestade é de aproximadamente 100 km/h (Blöschl & Sivapalan, 1995; Nunes, 2007).

Com este teste foi possível observar uma melhoria expressiva dos resultados, registando-se valores de $R^2 = 0,86$ (desempenho muito bom), $NSE = 0,58$ (desempenho satisfatório) e $RSR = 0,64$ (desempenho satisfatório), no período das 12h do dia 5 de dezembro às 12h do dia seguinte.

Saliente-se que a estação meteorológica suprarreferida não se localiza no interior da bacia hidrográfica, e que os eventos de precipitação podem ser mais intensos numa área da bacia no que outra, com características do solo muito diferenciadas, sendo que o modelo não se encontra configurado para fazer essa distinção.

Outro aspeto que se deve ter em conta é que os eventos de precipitação analisados são relativamente pequenos, face aos dados de precipitação existentes e, portanto, mais difíceis de simular.

Com a premissa de que os resultados dos processos de modelação são tanto mais confiáveis quanto maior o período de análise (Arnold et al., 2012; Santos et al., 2018), procedeu-se à construção de um modelo hidrológico 3D que considerasse um período de análise substancialmente superior (anos hidrológicos de 2009 e parte de 2010), permitindo avaliar o efeito dos parâmetros relativos à atmosfera, rede de drenagem (*1D Drainage Network*), escoamento superficial (*2D RunOff*), zonas saturadas e não saturadas do solo (*3D Porous Media*) e vegetação, no comportamento da bacia hidrográfica.

Esta análise permite também fazer uma comparação entre os caudais obtidos pelos modelos 2D e 3D e os observados na estação hidrométrica da Senhora da Rocha, atendendo aos três eventos de precipitação selecionados para calibração e validação do modelo 2D.

No subcapítulo II.3.2 estão detalhadas as características e aspetos relativos às configurações do modelo hidrológico 3D calibrado, cujos resultados se apresentam na figura III.2.

De referir que estas simulações constituem um trabalho moroso e apresentam um tempo de computação superior, face à complexidade e extensão dos processos a modelar, já que são calculados os fluxos de água entre o meio poroso, a superfície e a rede de drenagem, e sendo que a extração de água do sistema ocorre por evaporação ou através da transpiração das plantas.

Como se pode comprovar pela figura III.2, mediante uma análise mensal, o modelo apresenta melhores resultados do que uma análise diária, evidenciando, efetivamente, que simular períodos mais longos resulta num melhor desempenho do modelo e que se adquire uma dificuldade acrescida na calibração de modelos que considerem eventos relativamente curtos.

Da comparação dos dois modelos hidrológicos desenvolvidos (ver tabela III.1 e figuras III.1 e III.2), verifica-se que os caudais modelados com o modelo 3D apresentam resultados sensivelmente melhores, em particular no evento de precipitação do dia 29 de outubro de 2010.

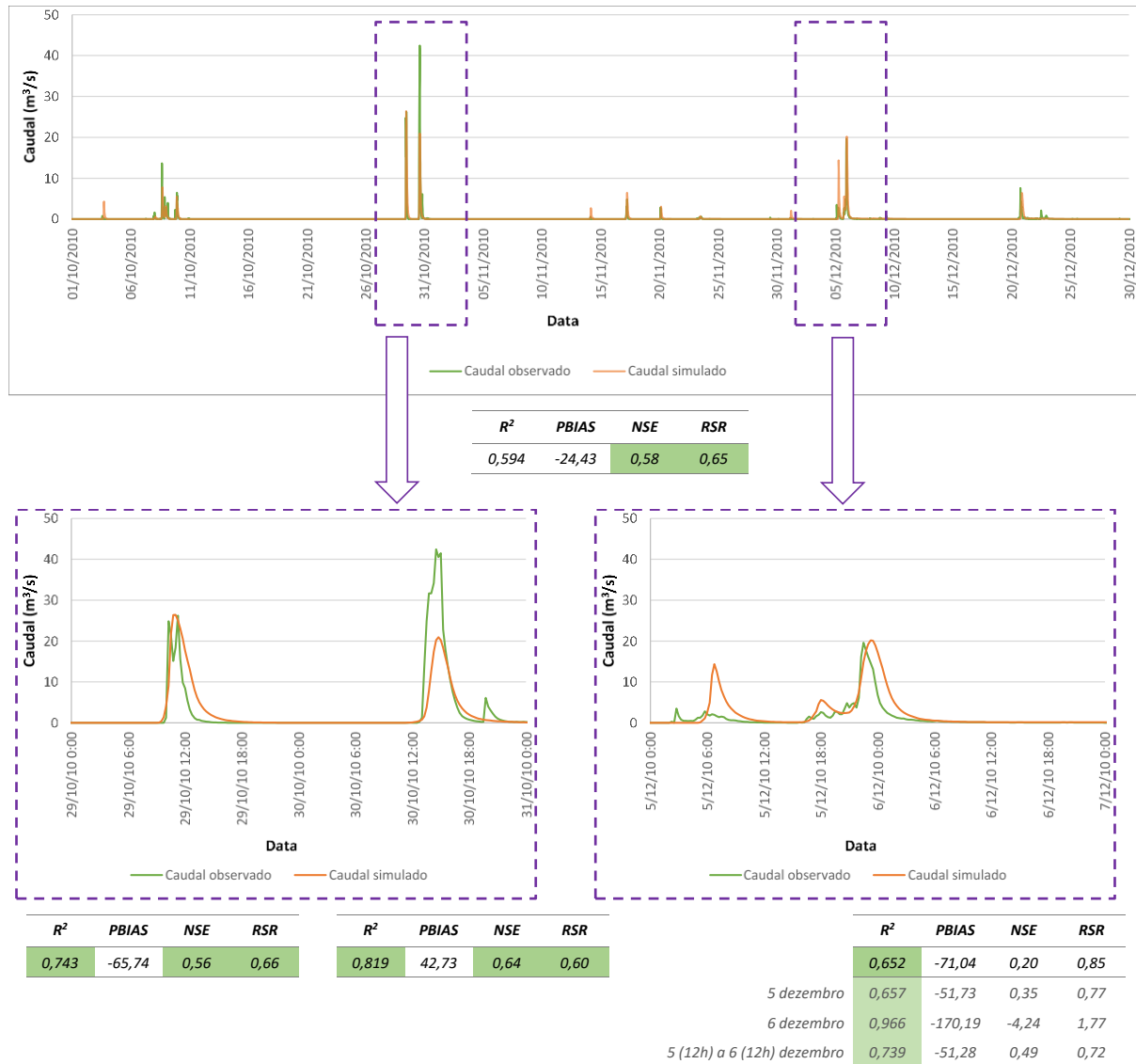


Figura III.2 – Comparação entre os caudais simulados (laranja) e observados (verde), nos primeiros três meses do ano hidrológico de 2010 (em cima) e nos três eventos de precipitação investigados na presente dissertação (em baixo), considerando as configurações de modelo 3D calibrado. Em tabelas constam os resultados da análise estatística, estando a sombreado de cor verde os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.

Tabela III.1 – Análise comparativa do desempenho dos modelos hidrológicos 2D e 3D, tendo por base os diferentes indicadores estatísticos considerados. A sombreado de cor verde estão os indicadores cujos resultados são considerados aceitáveis.

Modelo hidrológico	Escala temporal	Evento	Indicador estatístico			
			R^2	PBIAS	NSE	RSR
2D	diária	29 de outubro	Satisfatório	-	-	-
		30 de outubro	(próximo do aceitável)	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
		5 e 6 de dezembro	-	-	-	-
3D	mensal	outubro a dezembro	(próximo do aceitável)	-	Satisfatório	Satisfatório
	diária	29 de outubro	Satisfatório (quase bom)	-	Satisfatório	Satisfatório
		30 de outubro	Bom	-	Satisfatório	Bom
		5 e 6 de dezembro	Satisfatório	-	-	-

Relativamente ao evento do dia 30 de outubro, os dois modelos obtiveram caudais simulados inferiores aos observados, não obstante os resultados do modelo 3D serem classificados como bons e satisfatórios.

Analisando os dados históricos nesse dia e no dia precedente, constata-se que o primeiro evento de precipitação registou precipitações mais intensas do que o segundo evento, sendo, no entanto, os caudais observados mais baixos no primeiro dia. Uma explicação plausível para este comportamento seria de que a precipitação do dia 29 de outubro provocou uma certa saturação do solo, que, aquando a ocorrência da segunda chuvada, este, não tendo tanta capacidade de infiltração, proporcionou um maior escoamento superficial e, consequentemente, um maior caudal na linha de água.

No modelo 3D, estando o meio poroso configurado sem a presença do nível freático nos seus 5,0 m de espessura, a condutividade hidráulica conduziu à infiltração da precipitação, não sendo as características hidráulicas do solo suficientes para a retenção da água no solo aquando esse segundo evento. Aliado a esse facto, entra também a vegetação e os respetivos processos de absorção/transpiração que ocasionam caudais ligeiramente inferiores, em particular neste mês de outubro, onde foram configuradas opções de *Planting Julianday*⁶¹ para o dia 3 de outubro.

No que diz respeito ao evento de 5 e 6 de dezembro, registou-se uma ligeira melhoria nos resultados, em comparação com os simulados pelo modelo 2D. Ainda assim, persiste o comportamento observado na primeira metade do dia 5 de dezembro (caudal simulado substancialmente superior ao observado), ainda que com um pico de caudal inferior (caudal máximo simulado com o modelo 2D é igual a 18,50 m/s enquanto que com o 3D é de 14,38 m/s), bem como a evolução tardia dos caudais associados ao segundo pico.

Em jeito de apreciação, face aos resultados obtidos pelos dois modelos hidrológicos desenvolvidos e considerando o espaçamento da malha, o tempo de computação dos processos, bem como a dificuldade intrínseca a processos mais complexos, onde se considera um maior número de parâmetros a ajustar aquando a calibração do modelo, considera-se que o modelo hidrológico bidimensional de maior resolução constitui uma boa metodologia e representação dos processos hidrológicos observados na bacia.

Há que relembrar que esta investigação consiste na modelação de cheias e inundações rápidas numa bacia hidrográfica de pequenas dimensões, cujo tempo de concentração ronda as 6-7h.

Na literatura é, também, possível encontrar outros estudos focados na modelação de cheias e inundações, tendo por base um modelo bidimensional e utilizando diferentes códigos (ver e.g. Action Modulers, 2013; APA et al., 2014; Buta et al., 2018; Morais et al., 2019; Papaioannou et al., 2016; Sangati et al., 2009; Xia et al., 2011).

De forma a fundamentar o comportamento dos modelos no dia 30 de outubro e na primeira metade do dia 5 de dezembro de 2010, fez-se uma comparação entre a precipitação registadas na estação Meteorológica de Caneças (dados do SNIRH) e numa estação privada localizada em Barcarena (dados disponibilizados no site do *Weather Underground*⁶²), de modo a averiguar se os registos diferenciavam muito entre si, quer a nível de ocorrência quer a nível de intensidades. De referir que estes últimos dados foram conhecidos numa fase avançada da presente investigação e que ambas as estações se localizam fora da bacia hidrográfica (Caneças a Nordeste do rio Jamor e Barcarena a Oeste/Sul do mesmo). Ainda assim constituem uma análise complementar ao estudo.

⁶¹ Diz respeito ao dia juliano em que o plantio ocorre.

⁶² O *Weather Underground* é um serviço meteorológico comercial que fornece informações meteorológicas em tempo real pela Internet e pode ser consultado em: <https://www.wunderground.com/> (acedido em 29/08/2019).

Como se pode observar na figura III.3, verifica-se que no evento do dia 30 de outubro, a estação de Barcarena registou um máximo de precipitação superior à da estação de Caneças, na ordem de 1,9 vezes. Ora, a modelação com precipitações mais intensas induz caudais superiores, isto mantendo as restantes configurações do modelo, pelo que, com esta premissa, poder-se-ia justificar o pico de caudal observado nesse dia pela ocorrência de precipitações mais intensas. De facto, é bastante comum registarem-se precipitações mais intensas em zonas próximas do mar do que em zonas mais afastadas (ver e.g. Trigo et al., 2002).

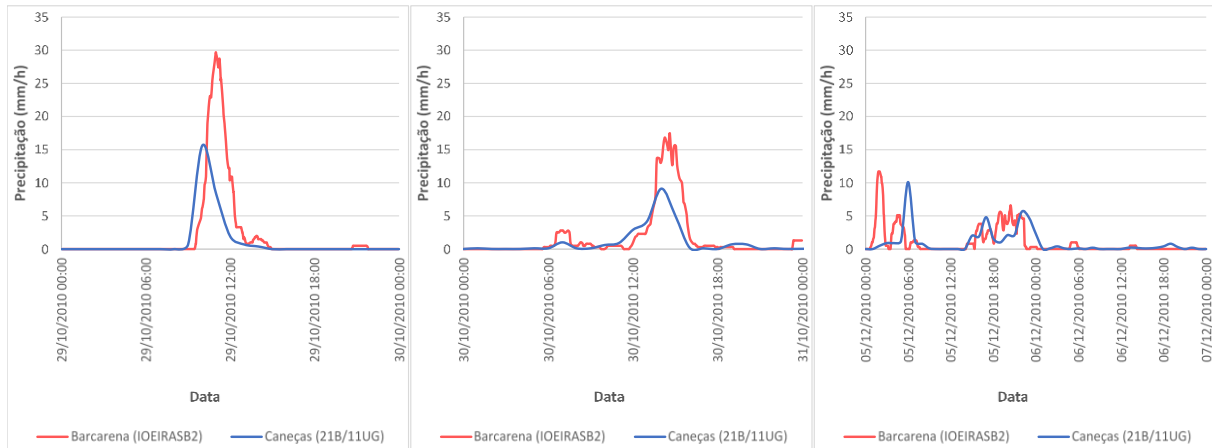


Figura III.3 – Comparação entre as precipitações registadas nas Estações Meteorológicas de Caneças (linha azul) e Barcarena (linha vermelha), nos eventos considerados para calibração (29 e 30 de outubro de 2010) e validação do modelo (5 e 6 de dezembro de 2010).

A estação de Barcarena também fornece dados meteorológicos com passos de tempo sub-horários. Sendo o passo de tempo da precipitação importante neste tipo de análises, já que os mais baixos tendem a testar precipitações com maior intensidade, procedeu-se ao ajuste dos dados de precipitação da estação de Barcarena à precipitação horária da estação de Caneças, de forma a avaliar o seu impacto nos resultados.

Uma vez que os intervalos desses dados são irregulares (entre 2 e 10 minutos), não foi possível a aplicação do método de transformação proposto pelo INAG. Assim, optou-se por um método mais simples que consistiu em ajustar o melhor possível a quantidade de precipitação e sua hora de ocorrência aos registos de Caneças, resultando na precipitação transformada apresentada na figura III.4.

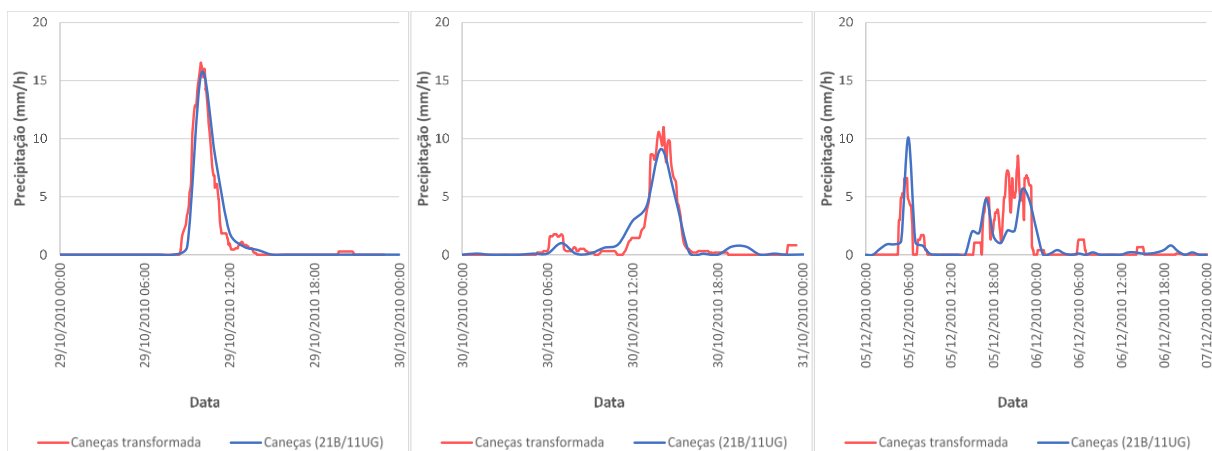


Figura III.4 – Comparação entre as precipitações registadas nas estações meteorológicas de Caneças (linha azul) e a precipitação Caneças transformada (linha vermelha), nos eventos considerados para calibração (29 e 30 de outubro de 2010) e validação do modelo (5 e 6 de dezembro de 2010).

Como se pode observar pela figura, as diferenças entre as precipitações registadas na estação de Caneças e a sua transformada não são significativas, com exceção do evento considerado para validação do modelo, onde se verificam precipitações com menor intensidade no primeiro pico e com maior intensidade entre as 18 horas e a meia noite do dia 5 de dezembro.

2. Caracterização do regime de inundações na zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena

2.1. Contributo das precipitações extremas e/ou do forçamento oceanográfico nas cheias e inundações

Para a avaliação ou quantificação do potencial de inundação causada pelos efeitos conjuntos e individuais das precipitações extremas e do forçamento oceanográfico apreciaram-se os resultados da modelação hidrológica e hidráulica, considerando os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos e os cenários listados na tabela II.15.

Da análise dos mapas obtidos nos processos de modelação hidráulica, constatou-se que as alterações induzidas pela variação do nível do mar são observáveis em áreas muito específicas, concentradas na zona onde a ribeira extravasa para as suas margens e junto à foz. Por isso, e para fins de determinação do peso que cada componente tem, considerou-se uma área de observação, comum em todos os mapas, que obedecia um determinado critério que tinha por base a situação mais desfavorável de inundação – o período de retorno de 100 anos, no cenário futuro de alterações climáticas de longo prazo (2071-2100), e o respetivo nível alcançado pelo mar em situação de tempestade (NM_{max} igual a 3,20m).

Esse critério consistiu na identificação, no ArcGIS, das células da malha com cotas iguais ou inferiores a 5,0 m, de onde depois se fez um *buffer* de 2,5 m de forma a garantir que todas as colunas de água com valores de profundidade máxima e perigosidade associada considerados relevantes fossem contabilizadas.

Destes processos resultaram os mapas do Anexo 4, constituídos por 5881 pixéis ou células computacionais⁶³, cada um, e cuja análise compreende as diferenças observadas na área de observação, não só no que diz respeito à profundidade máxima de inundação (HC) e perigosidade associada (P), como também no respetivo nível máximo da inundação (HC_{max}), e nível máximo de perigosidade da inundação (P_{max}), tal como se apresenta no seguinte subcapítulo.

Importa referir que a não análise das velocidades de escoamento deve-se ao facto de a perigosidade ser função não só das profundidades máximas de inundação, como das respetivas velocidades de escoamento, bem como ao facto de as alterações induzidas pela subida do mar se darem ao nível da foz (conforme se detalha mais abaixo, no subcapítulo III.2.2), em resposta do desnível entre as alturas de água existentes entre os dois meios.

2.1.1. Análise da profundidade máxima de inundação na área de observação

Da caracterização da profundidade máxima de inundação obtidas em cada área de observação, resulta a figura III.5, que identifica o número de células relativas a cada classe de valores, em cada uma das condições de cheia simuladas. Embora nos mapas em Anexo 4 se tenham definido 6 classes de valores para a profundidade máxima de inundação, esta ilustração condensa os resultados em 3 classes, com intervalos de 1,0 m, de forma a facilitar a visualização de resultados.

⁶³ Cada pixel ou célula computacional tem um máximo aproximado de 25,0 m².

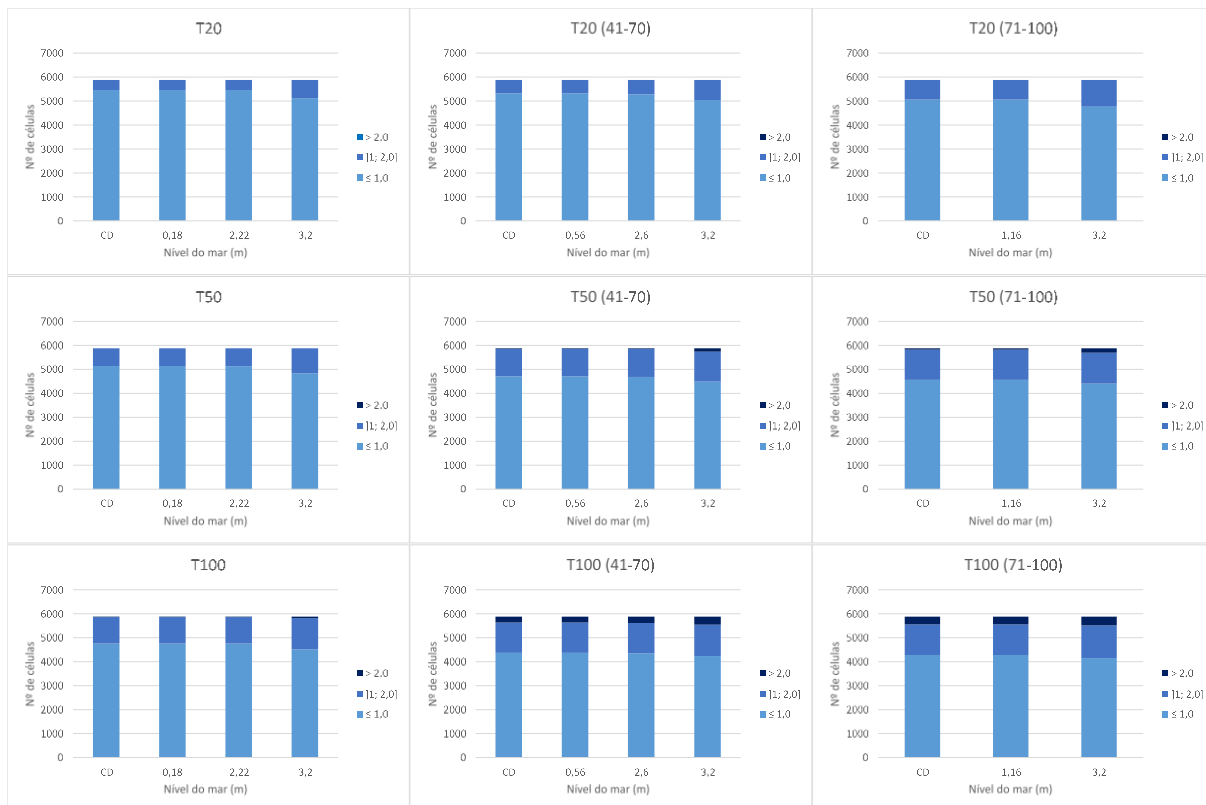


Figura III.5 – Distribuição do número de células, por classe de valores de profundidade máxima de inundação, obtidos na situação presente (colunas da esquerda), e futura de médio prazo (colunas do centro) e longo prazo (colunas da direita). A azul claro estão as células com alturas de água inferiores e iguais a 1,0 m, a azul, as células com alturas entre 1,0 e 2,0 m e a azul escuro, as células com alturas iguais ou superiores a 2,0 m.

Como se pode observar na figura, as inundações de média probabilidade de ocorrência⁶⁴ apresentam áreas de maior profundidade superiores às registradas em cheias de elevadas probabilidades de ocorrência, sendo essas tanto menores quanto menor o período de retorno associado.

Verifica-se também, que desde o momento presente até ao final do século, há um incremento progressivo, ainda que pouco substancial, nas áreas de maior profundidade de inundação, com exceção das cheias caracterizadas por períodos de retorno de 100 anos que, em qualquer cenário futuro, constituem áreas com profundidade superior a 2,0 m, independentemente da situação de forçamento oceanográfico considerado.

Para todos os períodos de retorno e cenários de alterações climáticas considerados, verifica-se que o aumento do nível do mar promove uma diminuição progressiva, ainda que residual, do número de células com profundidade máxima de inundação inferiores ou iguais a 0,50 m (ver tabela em Anexo 5), com consequente incremento em classes de valores mais elevados⁶⁵.

Verifica-se também que condições normais de forçamento oceanográfico não implicam alterações no número total de células em cada classe de valores, com exceção do período de retorno de 20 anos, no período atual, que apresenta uma variação percentual exígua de 0,02%.

Já em cheias articuladas com um nível do mar igual a 3,20 m, as áreas de menor profundidade diminuem com maior relevância, especialmente no caso de períodos de retorno de 20 anos, na situação presente.

⁶⁴ De acordo com o Decreto-lei nº 115/2010, de 22 de outubro, a periodicidades iguais ou superiores a 100 anos, associam-se inundações de média probabilidade de ocorrência. E classificam-se como inundações de elevada probabilidade de ocorrência aquelas associadas a períodos de retorno inferiores a 100 anos.

⁶⁵ Saliente-se que a diminuição de áreas com classes de valores mais baixas resulta no incremento de áreas com maiores valores de profundidade, pois o número total de pixéis existentes na área de observação é igual em todas as simulações realizadas.

Não obstante, este NM corresponde a um valor superior ao alcance máximo do mar em situação atual de tempestade.

Assim, dada a ocorrência de tempestade no mar, a diminuição mais acentuada nas áreas com alturas de água iguais ou inferiores a 0,50 m, dá-se no cenário futuro de longo prazo, em período de retorno de 50 anos, cuja variação percentual ronda dos 3,80% (ver tabela em Anexo 5). Concomitantemente, regista-se um incremento na ordem dos 2,15% na classe de valores entre 2,0 e 2,50 m. Contudo, em episódios excepcionais de precipitação, as profundidades máximas de inundação atingem valores superiores a 2,50 m.

2.1.2. Análise do nível de perigosidade da inundação na área de observação

À semelhança com o procedido aquando análise da profundidade máxima, também na caracterização da perigosidade da inundação se determina o número de células relativas a cada classe de valores, em cada uma das condições de cheia simuladas, conforme ilustrado na figura III.6.



Figura III.6 – Distribuição do número de células, por classe de valores de perigosidade, obtidos na situação presente (colunas da esquerda), e futura de médio prazo (colunas do centro) e longo prazo (colunas da direita). A amarelo estão as células com perigosidade Inexistente e Baixa, a laranja, as células com perigosidade Média e a vermelho, as células com perigosidades Alta e Muito Alta.

Como se pode observar, para qualquer situação de forçamento oceanográfico conjugado com precipitações de intensidades mais ou menos intensas, desde a situação atual até ao final do século, a maior parte da área em observação exhibe níveis de perigosidade classificadas como Inexistente ou Baixa (colunas a amarelo). Sendo a perigosidade função não só da altura de água, como da velocidade do escoamento, o facto de nas áreas de observação se notarem maioritariamente velocidades pequenas (ver por exemplo a figura III.15 e III.18 e/ou os mapas de zonas inundáveis relativos à velocidade do

escoamento apresentados em Anexo 6, discutidos mais abaixo), face aos declives pouco acentuados que se fazem sentir em grande parte da região, faz com que a perigosidade associada seja pouco significativa.

Da análise da figura III.6, verifica-se também que, na situação presente, as precipitações excepcionais potenciam a perigosidade em algumas áreas, que no caso de eventos mais recorrentes de precipitação (período de retorno de 20 anos) apresentam impactos pouco significativos.

Verifica-se também, que desde o momento presente até ao final do século, há um incremento progressivo, ainda que pouco significativo (exceção para o períodos de retorno de 100 anos), nas áreas com níveis de perigosidade mais acentuados, sendo que cheias caracterizadas por períodos de retorno de 50 e 100 anos, em cenários futuros, constituem áreas com perigosidade Alta, independentemente da situação de forçamento oceanográfico considerado (exceção para períodos de retorno de 50 anos no cenário de médio prazo, em que a perigosidade Alta se projeta apenas na situação extrema de forçamento oceanográfico).

De forma a quantificar a resposta da variação do nível do mar nas perigosidades associadas às áreas de observação, apresenta-se a tabela III.2, que constitui as variações percentuais observadas nas 6 classes de valores definidas.

Tabela III.2 – Resposta da variação do nível do mar na distribuição da perigosidade da inundação: Variação percentual do número de células relativas a cada classe de valores. A sombreado vermelho estão as classes onde se registou uma diminuição no número de pixéis e a sombreado verde, as classes onde se verificou um aumento no número de pixéis.

Período de retorno	Forçamento oceanográfico	NM (m)	≤ 0,75 Inexistente	[0,75; 1,25] Baixa	[1,25; 2,5] Média	[2,5; 7,0] Alta	≥ 7,0 Muito Alta
T20	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,52	1,85	1,67	0,00	0,00
T20 (41-70)	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	0,56	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,05	-0,15	0,20	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-0,82	-0,43	1,24	0,00	0,00
T20 (71-100)	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-2,33	1,70	0,63	0,00	0,00
T50	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,03	-0,02	0,05	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-1,51	0,82	0,70	0,00	0,00
T50 (41-70)	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,36	0,26	0,10	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,21	2,45	0,70	0,07	0,00
T50 (71-100)	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	1,16	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-2,69	1,85	0,77	0,07	0,00
T100	Nulo	CD	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,20	2,47	0,71	0,02	0,00

	Nulo	CD	-	-	-	-	-
T100 (41-70)	Normal	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,10	0,05	0,05	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-1,12	0,71	0,27	0,14	0,00
	Nulo	CD	-	-	-	-	-
T100 (71-100)	Normal	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-1,43	0,63	0,51	0,29	0,00

Como se pode observar pela tabela, com o aumento do nível do mar verifica-se tendencialmente uma diminuição progressiva, ainda que residual, das áreas com perigosidade classificada como Inexistente, excetuando na situação de cheias com períodos de retorno de 20 anos conjugadas com situações de tempestade no mar, no período atual, em que a área se mantém.

Verifica-se também que em cheias articuladas com um nível do mar igual a 3,20 m, as áreas com perigosidade Inexistente diminuem ligeiramente, especialmente no caso de períodos de retorno de 20 anos, na situação presente, em conformidade com o que ocorre ao nível da profundidade máxima de inundação. Do mesmo modo que, dada a ocorrência de tempestade no mar, a diminuição mais acentuada de áreas com essa classificação ocorre no cenário futuro de longo prazo, em período de retorno de 50 anos, cuja variação percentual ronda dos 2,70%, e onde os níveis de perigosidade chegam a atingir a classe Alta.

Outro aspeto importante cinge-se ao facto de se projetarem níveis de perigosidade Alta, desde o presente até ao fim do século, em situações de inundações de média probabilidade de ocorrência conjugadas com NM iguais a 3,20 m.

Também, em cheias associadas a períodos de retorno de 50 e 100 anos, a imposição de um NM de 3,20 m promove incrementos nas áreas com perigosidade Alta em qualquer cenário de ocorrência (exceção para o período de retorno de 50 anos, no cenário atual).

Note-se que em nenhuma das cheias simuladas se registou, para a área em estudo, a classe de perigosidade Muito Alta.

2.1.3. Peso da precipitação no nível máximo e perigosidade máxima da inundação

A quantificação do peso das precipitações nas cheias e inundações é possível mediante análise dos resultados da modelação cuja condição de fronteira corresponde à opção “*Critical Depth*”, isto é, sem imposição de um valor constante correspondente ao nível do mar.

Das áreas de observação obtidas, determinou-se o nível máximo da inundação, bem como a perigosidade máxima registada, que se apresentam sumarizados na figura III.7 e III.8, respetivamente, considerando os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos relativos à precipitação observada e projetada em cenários futuros de alterações climáticas.

Observando os gráficos, constata-se que a intensidade das precipitações influencia expressivamente a perigosidade máxima e o nível máximo de inundação, sendo estes tanto maiores quanto mais extremo for o evento de pluviosidade.

Verifica-se também, da análise de cenários de alterações climáticas, um agravamento generalizado e progressivo do nível máximo de inundação, assim como da perigosidade máxima, desde o momento presente até ao cenário de longo prazo. No entanto, as diferenças são mais pronunciadas em eventos de cheia com probabilidade de recorrência de 100 anos, em especial no cenário futuro de médio prazo, onde se regista um incremento aproximado de 16,7 % no nível máximo de inundação, em comparação com a

situação presente, e de 31,90 % na perigosidade máxima (a perigosidade máxima passa de uma classificação Média para Alta).

Importa também referir, que atualmente a zona em estudo atinge um nível máximo de perigosidade classificado como Médio, independentemente de se tratar de uma inundação de elevada ou média ocorrência. Contudo, no futuro, para cheias com períodos de retorno de 50 anos (em cenário de médio prazo) ou com períodos de retorno de 100 anos (em cenários de médio e longo prazo), projeta-se uma perigosidade máxima com classe superior, a Alta, cujos impactos no que diz respeito à segurança de pessoas e bens são consideráveis.

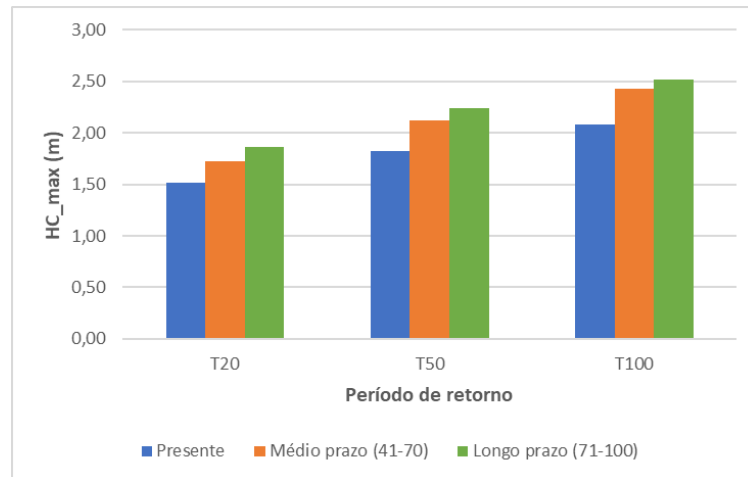


Figura III.7 – Contributo das precipitações no nível máximo da inundação. A imagem ilustra os resultados associados aos diferentes períodos de retorno, para a situação presente (azul), médio prazo (laranja) e longo prazo (verde), obtidos na modelação hidráulica sem imposição do NM como condição de fronteira a jusante.

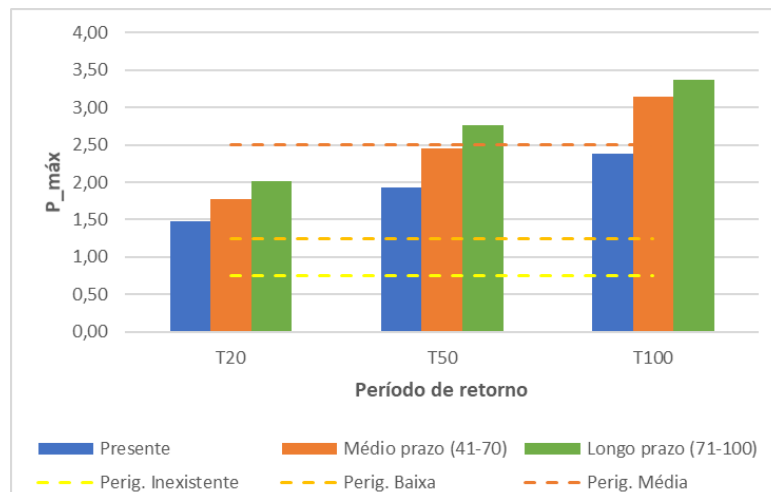


Figura III.8 – Contributo das precipitações na perigosidade máxima da inundação. A imagem ilustra os resultados associados aos diferentes períodos de retorno, para a situação presente (azul), médio prazo (laranja) e longo prazo (verde), com representação dos limites superiores das classes de nível de perigosidade Inexistente (linha tracejada de cor amarelo), Baixa (linha tracejada de cor laranja claro) e Média (linha tracejada de cor laranja escuro).

2.1.4. Peso do forçamento oceanográfico nas cheias e inundações

De forma a analisar os efeitos induzidos pelo forçamento oceanográfico nas cheias e inundações da área de observação, compilaram-se, primeiramente, os valores de nível máximo da inundação, para todas as situações simuladas, tal como exposto na figura III.9.

Saliente-se que, com exceção dos modelos configurados com a condição de fronteira “*Critical Depth*”, equivalente aos valores de NM nulo, todos os resultados constituem o efeito conjunto das precipitações e forçamento oceanográfico, pelo que a figura permite analisar a resposta da variação do NM (com identificação da situação normal de forçamento oceanográfico e de tempestade) no valor máximo de altura de água observado em cada período de retorno e cenário de alterações climáticas.

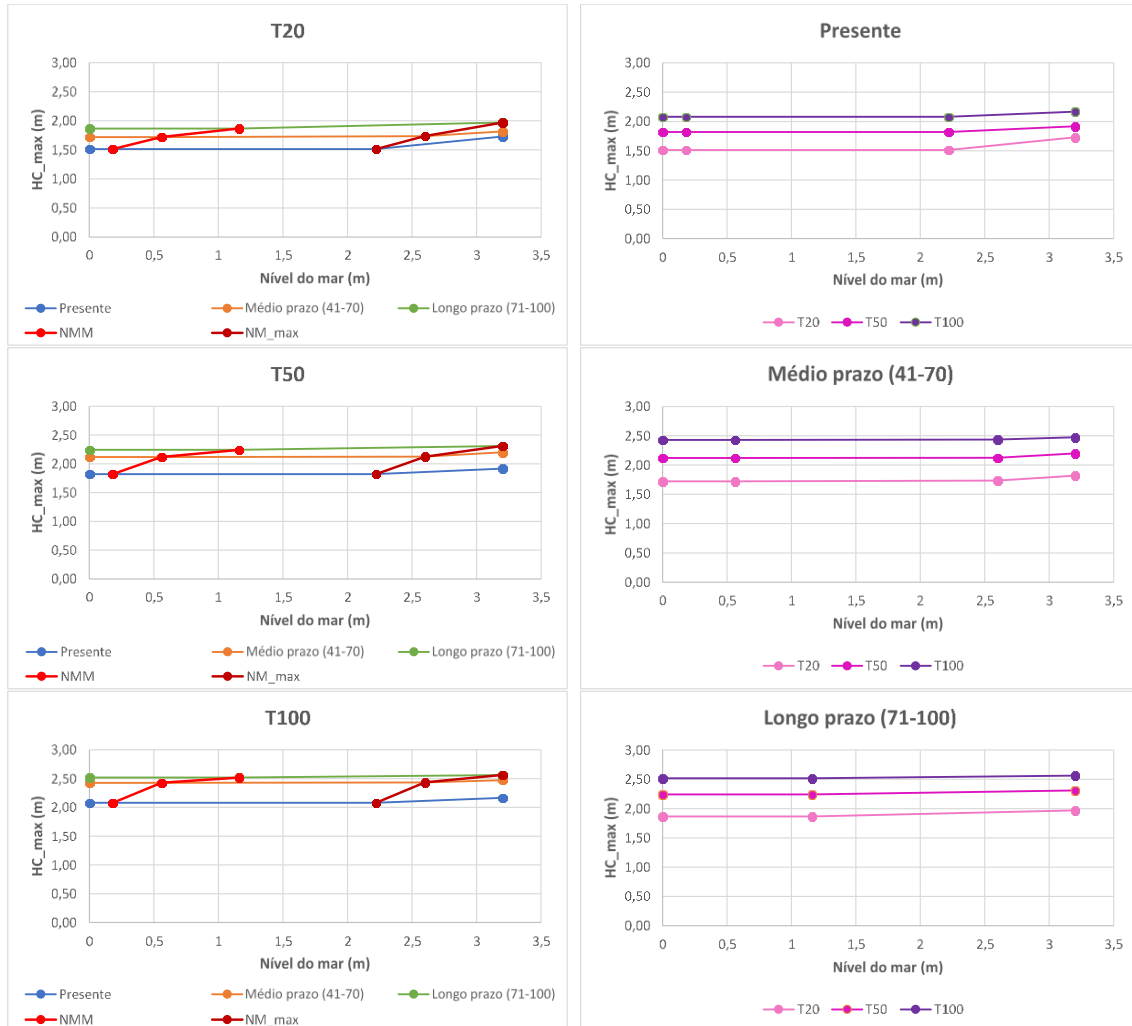


Figura III.9 – Resposta da variação do nível do mar no nível máximo da inundação, com representação da condição normal de forçamento oceanográfico (linha a vermelho) e de tempestade (linha a vermelho escuro). A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).

Como se pode observar, o incremento do NM induz modificações pouco significativas no nível máximo da inundação, independentemente do cenário de alterações climáticas analisado e intensidade das precipitações.

No futuro, e em particular no cenário de longo prazo, verifica-se que a ocorrência de tempestade no mar projeta impactos mais preponderantes em situações de cheias de elevada recorrência (20 anos), com um incremento aproximado de 5,6 % no nível máximo da cheia (ver figura III.10, que diz respeito à variação percentual induzida pelo mar, em cada situação simulada).

Não obstante, é na situação presente, em eventos de precipitação associados ao período de retorno de 20 anos conjugados com níveis extremos do mar iguais a 3,20 m, que se verifica a maior variação percentual no nível máximo da inundação, com uma subida na ordem dos 14,4 %. Este incremento justifica-se pelo

facto de um nível do mar correspondente a 3,20 m constituir um valor muito superior ao nível médio do mar observado na situação atual, ou até mesmo ao alcance máximo do mar em situação de tempestade, sendo, por isso, os seus efeitos tanto menores, quanto maior a intensidade das precipitações (períodos de retorno de menor recorrência), em que caudais maiores induzem alturas de água maiores.

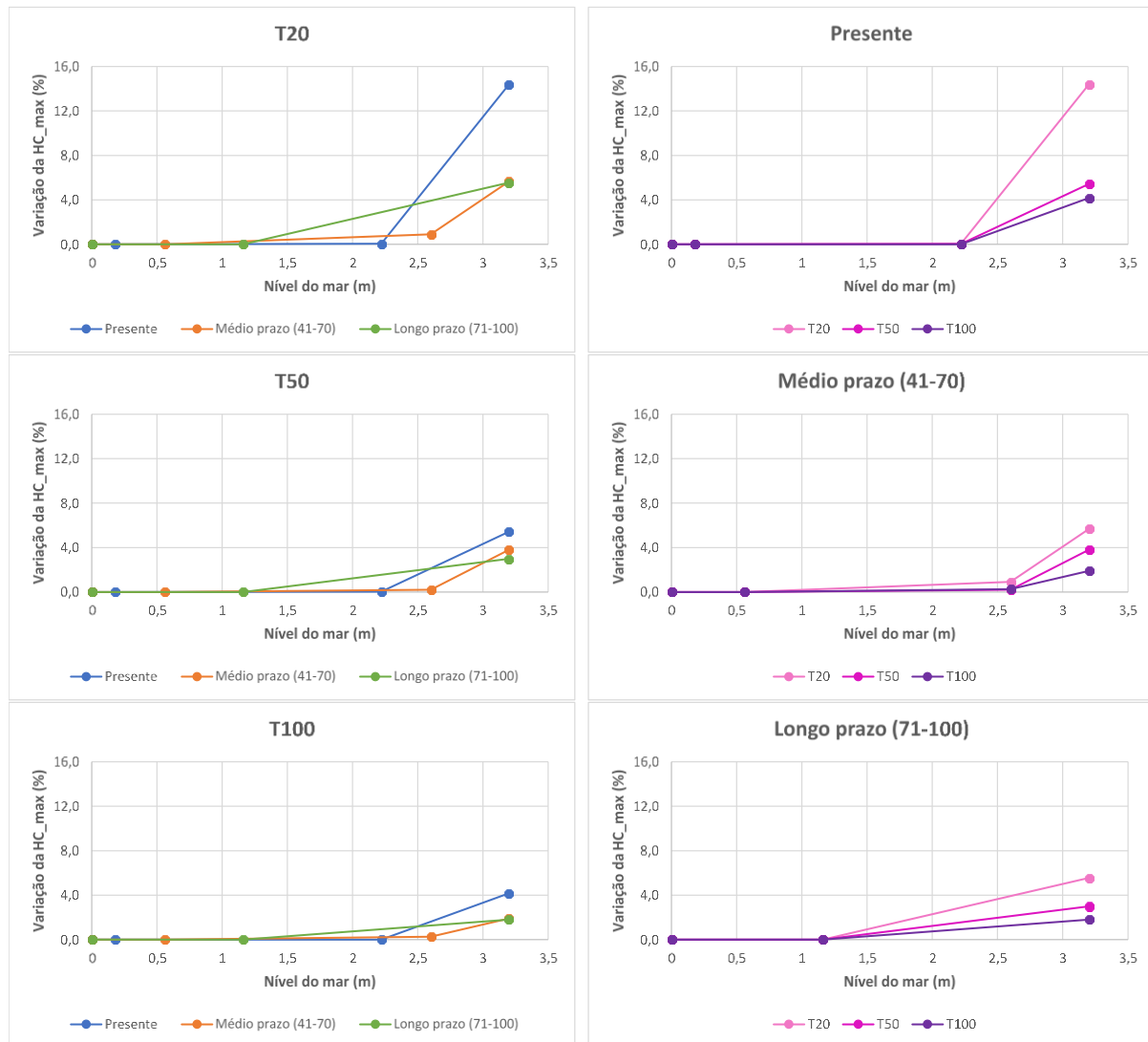


Figura III.10 – Contributo do forçamento oceanográfico no nível máximo da inundação, em percentagem. A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).

Da análise de cenários de alterações climáticas, observa-se também uma diminuição progressiva na resposta da subida do nível do mar desde o momento presente até ao cenário de longo prazo, que se projetam tanto mais fortes quanto menor o período de retorno analisado.

Ainda que os contributos do forçamento oceanográfico sejam pouco significativos na zona crítica da bacia hidrográfica, não tendo, em muitas situações, qualquer influxo no que respeita ao nível máximo da cheia, os seus efeitos fazem-se sentir de forma gradual a partir de valores de NM compreendidos entre 2,22 e 2,60 m.

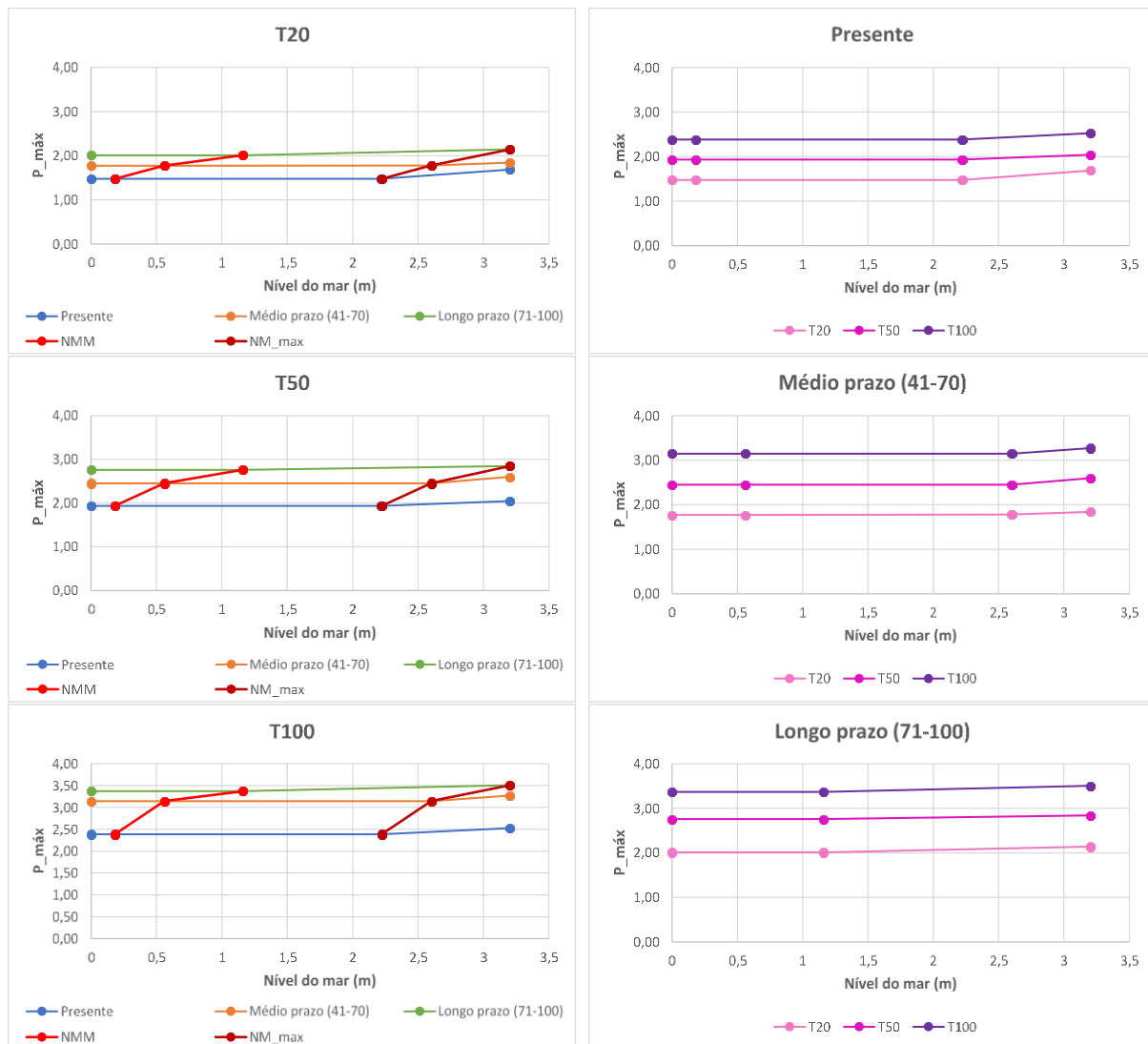
Em relação aos efeitos induzidos na perigosidade máxima da inundação, observam-se alguns comportamentos semelhantes aos projetados para o nível máximo da inundação, isto porque a perigosidade depende não só da velocidade do escoamento, como também da profundidade máxima da coluna de água (ver figuras III.11 e III.12).

Destaca-se que, no cenário de longo prazo, a ocorrência de tempestade no mar projeta impactos mais preponderantes em situações de cheias de elevada recorrência (20 anos), com um incremento aproximado de 6,6 % no nível máximo de perigosidade. Contudo, é na situação presente que um NM igual a 3,20 m induz uma maior variação percentual, com um aumento na ordem dos 14,3 %.

Importa referir, no entanto, que em qualquer cenário de alterações climáticas, os efeitos que um NM igual a 3,20 m induzem não são suficientes para aumentar a classe de perigosidade, estando projetada, para períodos de retorno de 20 anos, uma perigosidade máxima classificada como Média.

Verifica-se também, que apesar dos contributos do forçamento oceanográfico serem pouco significativos na variação do valor máximo da perigosidade, observam-se respostas em valores de NM superiores a 2,22 m.

No futuro, os seus impactos na segurança de pessoas e bens são mais acentuados, sendo que um nível do mar igual a 3,20 m conjugado com precipitações associadas a períodos de retorno mais altos (50 e 100 anos) intensifica a perigosidade máxima, classificada como Alta (ver figura III.6 e tabela III.2). Algo que na situação atual acontece apenas em caso de precipitações excecionais.



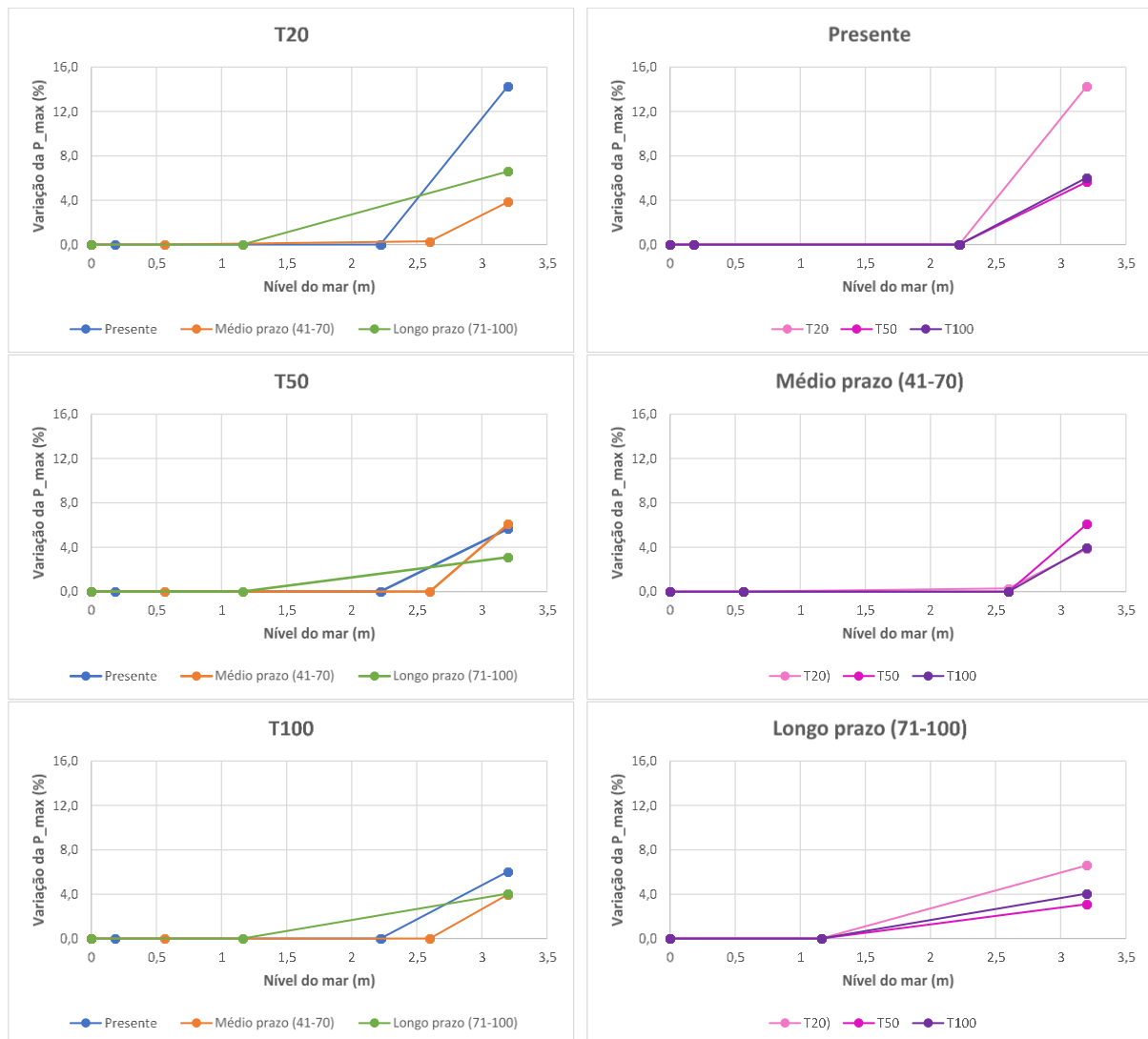


Figura III.12 – Contributo do forçamento oceanográfico na perigosidade máxima da inundação, em percentagem. A imagem ilustra os resultados associados ao cenário presente (linha azul) e cenário futuro de médio (linha laranja) e longo prazo (linha verde), para os períodos de retorno de 20 (linha rosa claro), 50 (linha rosa escuro) e 100 anos (linha roxa).

2.2. Vulnerabilidade a cheias e inundações – situação atual e futura

Através dos processos conjuntos de modelação hidrológica e hidráulica foi possível adquirir e avaliar as áreas propensas a cheias e inundações, quer ao nível do alcance máximo de inundação, como da profundidade máxima da coluna de água (HC), velocidade do escoamento (V_e) e perigosidade (P) associada aos diferentes períodos de retorno (20, 50 e 100 anos) e situações de forçamento oceanográfico (normal e tempestade), no presente e em cenários de alterações climáticas de médio e longo prazo.

Da exportação dos resultados obtidos no *MOHID Land* para o ArcGIS resultaram as cartas de zonas inundáveis apresentadas no Anexo 6, cujos detalhes integram os ortofotomapas fornecidos pela Câmara Municipal de Oeiras e o sistema de referência espacial PT-TM06/ETRS89 (*European Terrestrial Reference System* 1989)⁶⁶. Não obstante, no presente capítulo são apenas apresentadas aquelas que se consideram pertinentes à análise e discussão, representadas nas figuras III.13 a III.18, que constituem

⁶⁶ Em conformidade com o sistema de referência seguido atualmente pelo Instituto Geográfico Português (IGP) e o referenciado pela Direcção-Geral do Território (DGT).

os resultados concernentes aos períodos de retorno de 20 e 100 anos, no presente e no cenário futuro RCP8.5 para o período de 2071-2100, quer na situação normal de forçamento oceanográfico (valor correspondente ao NMM), como de tempestade (valor extremo associado ao período de retorno de 50 anos alcançados pelo nível do mar, NM_{max}).

Saliente-se, que as cartas de zonas inundáveis desenvolvidas constituem os pontos da malha onde a profundidade da água é igual ou superior a 0,10 m, valor a partir do qual se considera determinada área como inundada (APA et al., 2014; Dias et al., 2019; Morais et al., 2019).

Analisando as figuras ao nível do perímetro de inundação (ver por exemplo a figura III.13, que diz respeito às profundidades máximas de inundação registadas para situação normal de forçamento oceanográfico), são visíveis as diferenças em termos de extensão, sendo estas mais relevantes no caso de eventos de cheia com probabilidades de recorrência de 100 anos, principalmente na situação futura a longo prazo.

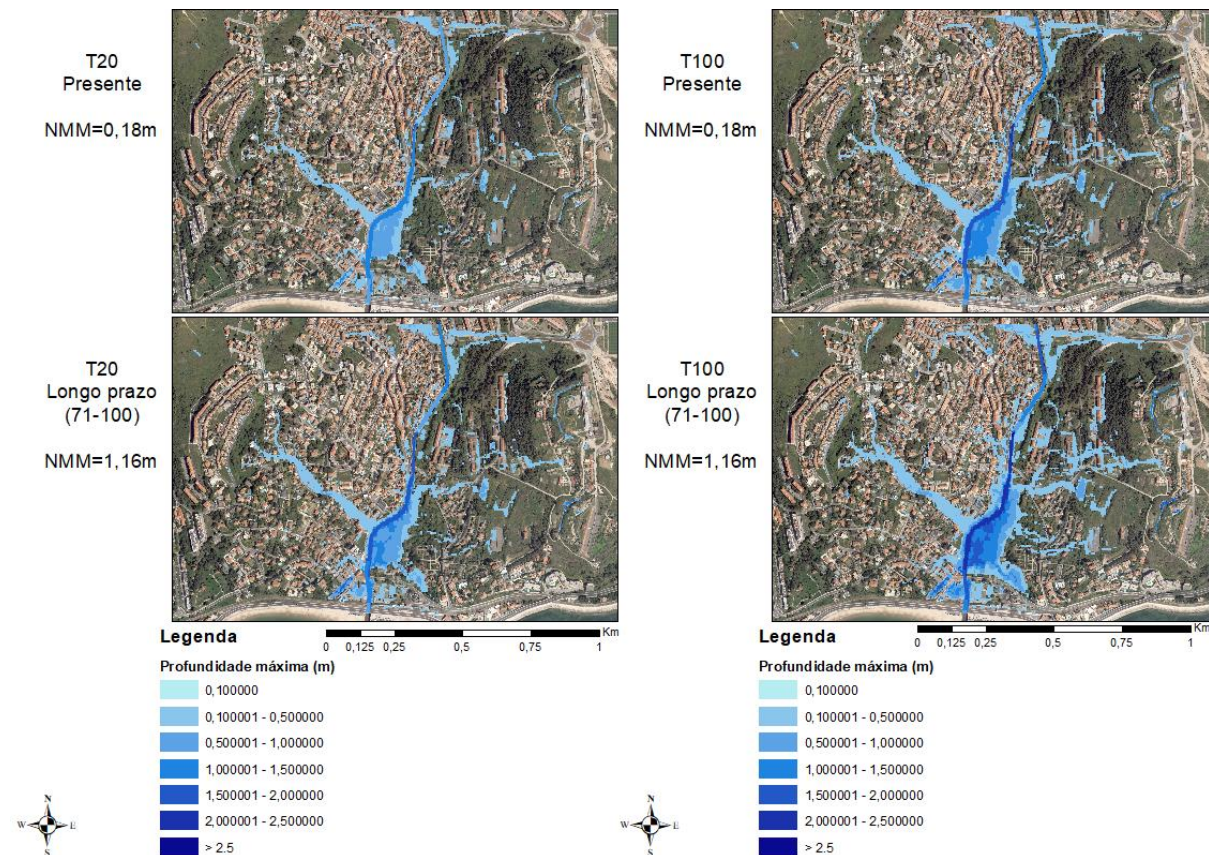


Figura III.13 – Profundidade máxima de inundação associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.

Constata-se ainda que, atualmente, em situações de cheias e inundações de elevada probabilidade de ocorrência, os níveis de profundidade mais elevados registam-se, sem surpresa, ao longo do canal da ribeira de Barcarena (que se encontra intervencionado), principalmente desde a parte montante da ponte da Estrada da Cartuxa (com máximos de profundidade na ordem dos 1,55 m) até às proximidades da ponte da Estrada Gibalta, localizada junto à foz (com máximos de profundidade na ordem dos 1,40 m).

Na área com ocupação urbana localizada a Oeste da Estrada Gibalta, em particular na Rua Mauperrin Santos (margem Oeste da ribeira), também há registo das maiores profundidades modeladas, cujos valores vão até 1,45 m, impondo consequências relevantes no arruamento e grande parte das habitações aí existentes.

Na frente ribeirinha, existem zonas onde a ribeira extravasa a Oeste com níveis de cheia que podem atingir os 1,40 m de profundidade, com implicações na circulação da Avenida António Florêncio dos Santos e constrangimentos na área envolvente, que inclui um caminho pedonal, bem como um espaço público de estacionamento e algumas moradias.

Não obstante, é na margem Este que se apresenta a área inundável mais significativa, em face às características topográficas do local, abrangendo praticamente a totalidade do terreno contíguo, pertencente ao Ministério da Justiça (terreno com vegetação, sem qualquer tipo de manutenção nos dias de hoje), bem como alguns dos caminhos pedonais e edifícios existentes na Quinta Real de Caxias e Cascata dos Jardins da Quinta Real de Caxias (manutenção da responsabilidade da Câmara Municipal de Oeiras, mediante protocolo com a entidade patronal, de forma reforçar as intenções municipais de efetivar um conjunto de fluxos funcionais e ecológicos com interesse paisagístico e cultural), com alturas de água que podem chegar até aos 1,40 m.

Aqui o espraio da cheia ou inundação chega a atingir parte dos edifícios e respetivos acessos existentes no terreno localizado imediatamente a Este, pertencente ao Ministério da Defesa Nacional/Exército Português, onde os valores de inundação podem atingir os 0,70 m de profundidade; assim como zonas não edificadas e zonas de ocupação residencial e comercial existentes a Nordeste da Quinta Real de Caxias, com alguns condicionamentos na circulação da Estrada da Cartuxa, onde os níveis de água podem subir até aos 0,60 m.

Nas imediações da Estrada Gibalta, especificamente a jusante/Sul, existem também alguns elementos expostos a estes processos, nomeadamente arruamentos e elementos afetos essencialmente a comércio e serviços ou equipamentos públicos (como o Jardim Municipal de Caxias e a Estação Elevatória de Barcarena), onde os níveis de água chegam a atingir os 0,90 m.

Relativamente ao tecido urbano compacto (marcado significativamente a Oeste da ribeira de Barcarena), onde há lugar os impactos mais diretos à população, são atingidos vários quarteirões de habitação, comércio e serviços, condicionando significativamente as atividades e movimentos em alguns dos arruamentos, dos quais fazem parte a Avenida António Florêncio dos Santos (frente ribeirinha), o Largo Alves Redol, a Rua Bernardim Ribeiro, parte da Rua Vasco da Gama e Rua Afonso de Albuquerque e, um pouco mais a Sul, a Avenida Croft de Moura e Avenida Gomes Freire. Enquanto que no primeiro grupo as alturas de água vão até um máximo de 0,85 m, no segundo, podem ir até aos 0,40 m.

Outras zonas também abrangidas pelas cheias e inundações são as áreas modeladas localizadas a Norte, que constituem os arruamentos e espaços (edificados e não edificados, incluindo os Lameiros da Cartuxa) contíguos e a Sul que vão desde o Grupo Desportivo Unidos Caxienses até ao Hospital Prisional São João de Deus (a Este da ribeira) e rede viária, arruamentos, habitações, comércio e áreas não edificadas localizadas a Norte da Rua Calvet de Magalhães (a Oeste da linha de água), bem como o que constitui a Rua Dom Francisco de Almeida e seu espaço envolvente. Nestas regiões, as profundidades máximas de inundação podem ir até aos 0,40 m no lado Este e aos 0,70 m no lado Oeste.

Existem outros pontos inundáveis na área em estudo, especialmente na zona Este da ribeira, que não têm origem no transbordo da ribeira de Barcarena e sim nas suas características topográficas, consistindo fundamentalmente em arruamentos, elementos relativos à habitação e património com importância significativa (como é o caso da Igreja/Convento da Cartuxa), zonas agrícolas com espaços naturais e seminaturais e infraestruturas rodoviárias, cujas alturas de água podem variar de zona para zona e até um máximo de 1,0 m.

De referir que foi realizada uma visita à zona em estudo, onde houve validação destes resultados em conversa com alguns moradores, agentes da polícia e funcionários da Junta de Freguesia de Caxias e da Câmara Municipal de Oeiras, que confirmaram as áreas e respetivas extensões em eventos presenciados.

Não obstante a extensão das zonas geográficas suscetíveis a cheias e inundações na atualidade, verifica-se que episódios de precipitação de elevada recorrência apresentam, de forma geral, perigosidades classificadas como Inexistente, com exceção da frente ribeirinha, na margem Oeste, e do troço fluvial, onde se verificam perigosidades classificadas como Baixa e Baixa a Média, respetivamente (ver figura III.14). Portanto, este tipo de ocorrências ocasiona constrangimentos pouco significativos e de relevância relativamente baixa no que diz respeito à segurança de pessoas, sendo, no entanto, necessária particular atenção na circulação da Av. António Florêncio dos Santos.

Essa perigosidade, assim como a extensão da inundação e respetiva profundidade, têm algumas dissemelhanças em situações de eventos com média probabilidade de ocorrência, conforme se observa nas figuras III.13 e III.14.

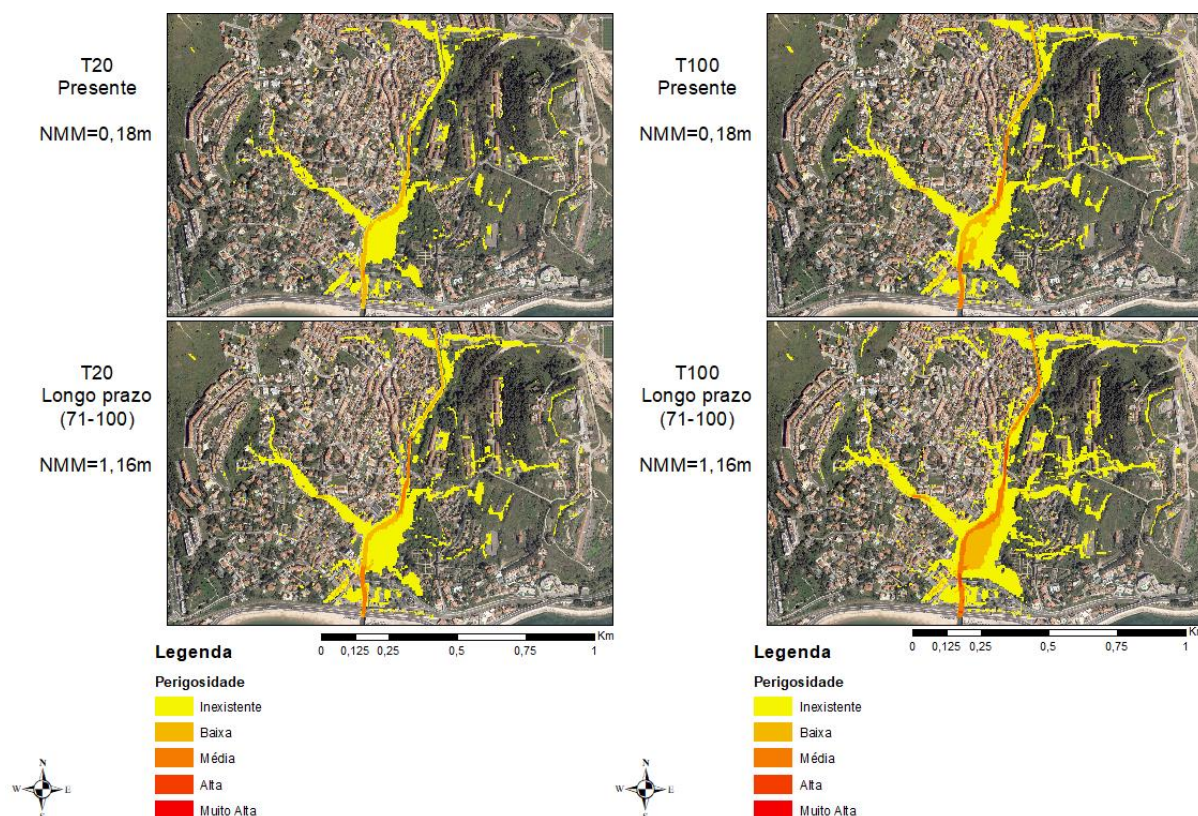


Figura III.14 – Perigosidade associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.

Ainda que as áreas mais afetadas tendam a manter-se, há efetivamente um aumento generalizado da extensão da inundação, podendo atingir novos elementos edificados e não edificados e consequências mais significativas nas atividades e movimentos da população, uma vez que a coluna de água pode subir até valores na ronda dos 1,80 m em zonas ribeirinhas (onde a ribeira extravasa a Oeste) e na área com ocupação urbana localizada a Oeste da Estrada Gibalta, e na ronda dos 2,10 m no leito do rio, especificamente a montante da ponte da Estrada da Cartuxa, sendo o nível de perigosidade associado classificado como Baixo e Médio, respetivamente.

Outra zona onde se verifica um incremento na perigosidade é a Rua Vasco da Gama, em plena área de alta densidade urbana, que passa da classe Inexistente para Baixa, em detrimento do aumento da

profundidade da coluna de água conjugada com velocidades de escoamento⁶⁷ potenciadas pela acentuada declividade e caudal local (ver figura III.15).

Já na margem Este da ribeira de Barcarena, os declives são menos expressivos, o que permite um maior espraio da inundação e, consequentemente, um maior perímetro de área afetada. Contudo, algumas frações do terreno contíguo à linha de água passam a ter perigosidade Baixa, em resultado do incremento da profundidade máxima de inundação inerentes a um episódio pluvial desta natureza.

Por fim, também a Estação Elevatória de Barcarena resente em eventos de média probabilidade de ocorrência, sendo passíveis de registar alturas de água na ordem dos 1,30 m e perigosidades classificadas como Baixa.

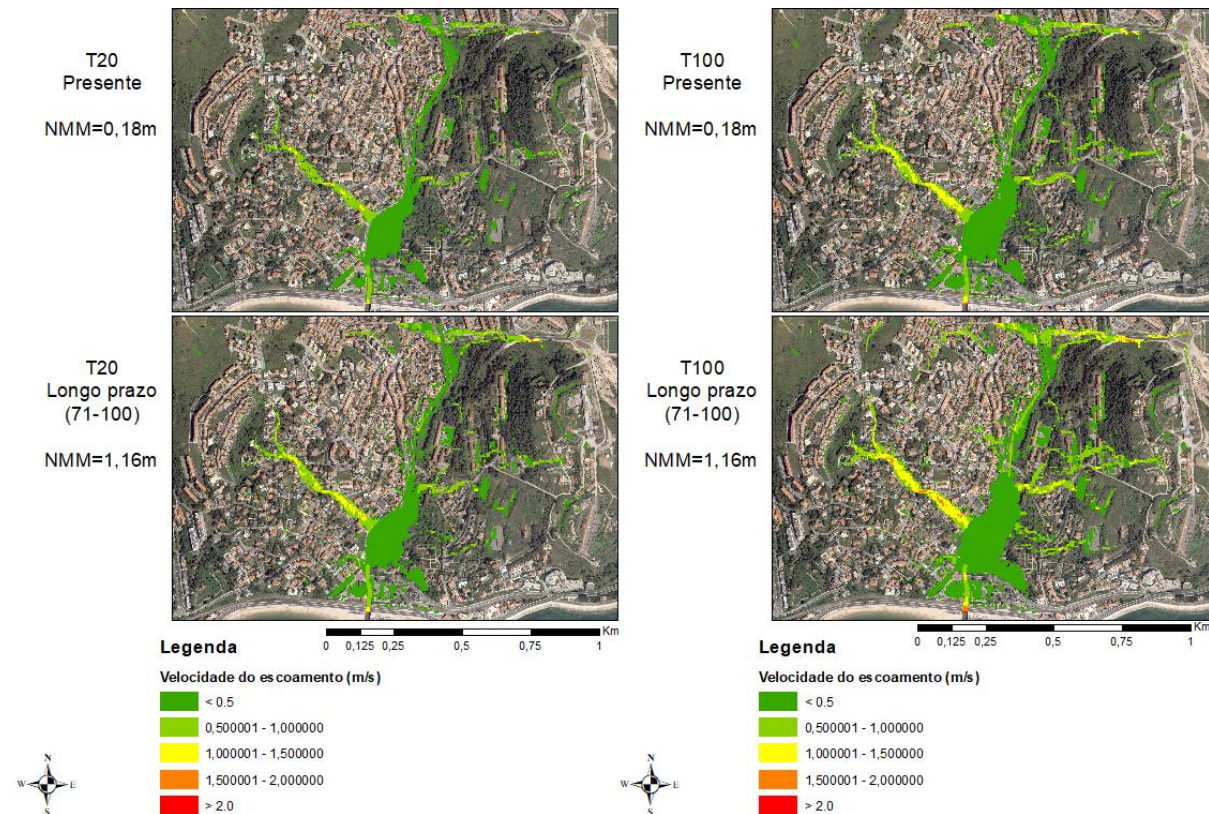


Figura III.15 – Velocidade do escoamento associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação normal de forçamento oceanográfico.

Em cenários de alterações climáticas observa-se, para o final do século, um incremento generalizado do perímetro inundável, ainda que com incidência regional similar, bem como da profundidade máxima de inundação e perigosidade associada.

Estes impactos fazem-se sentir de forma mais agravada em fenómenos extremos de precipitação (período de retorno de 100 anos), em detrimento do aumento acentuado da profundidade máxima da coluna de água e/ou da velocidade do escoamento, onde são projetadas as perigosidades classificadas como Altas no leito da ribeira (nas proximidades da ponte da Estrada da Cartuxa e Estrada Gibalta); seguido de zonas de perigosidade Média na frente ribeirinha, parte da margem Este da linha de água e na Rua Vasco da Gama; e zonas de Baixa perigosidade em situações pontuais no tecido urbano compacto, algumas das quais não atingidas na atualidade nem no período de retorno de 20 anos em

⁶⁷ Dado que a velocidade do escoamento associada à coluna de profundidade máxima de inundação depende do caudal e relevo da região, é perceptível que os caudais mais elevados, associados aos períodos de retorno menos recorrentes, reforcem a velocidade do escoamento naquele local.

cenário futuro de alterações climáticas, bem como na Estrada da Cartuxa, junto ao Largo da Cartuxa (acesso para a Igreja/Convento da Cartuxa), vulnerável apenas em fenómenos climáticos desta magnitude.

No caso da ocorrência de precipitações intensas coincidentes com valores extremos alcançados pelo mar em situação de tempestade (ver figuras III.16, III.17 ou III.18), verificam-se, atualmente, diferenças pouco significativas ao nível de perímetro inundável, com situações pontuais de expansão, quando comparado com uma situação normal de forçamento oceanográfico (ver figuras III.13, III.14 ou III.15). Verificam-se também alterações de expressividade reduzida no que diz respeito à profundidade máxima da inundação e perigosidade associada, que se dão em alguns pontos da linha de água e zona circundante.

Em cenários futuros de alterações climáticas, projetam-se aumentos com maior expressividade na extensão das zonas inundáveis, acompanhados de um agravamento na perigosidade associada, em detrimento do incremento da profundidade de inundação, cuja incidência se faz sentir na linha de água e espaços envolventes, em especial na zona onde a ribeira extravasa a Este e na zona da margem Oeste localizada a jusante da ponte da Estrada Gibalta.

A par com o sucedido na condição normal de forçamento oceanográfico, também nesta situação os efeitos das alterações climáticas futuras são mais preponderantes aquando uma situação de inundação de média probabilidade de ocorrência. Não obstante, verifica-se que no futuro, a subida do nível do mar induzida por tempestade no mar, terá efeitos mais sublinhados ao nível da extensão em inundações de elevada probabilidade de ocorrência.

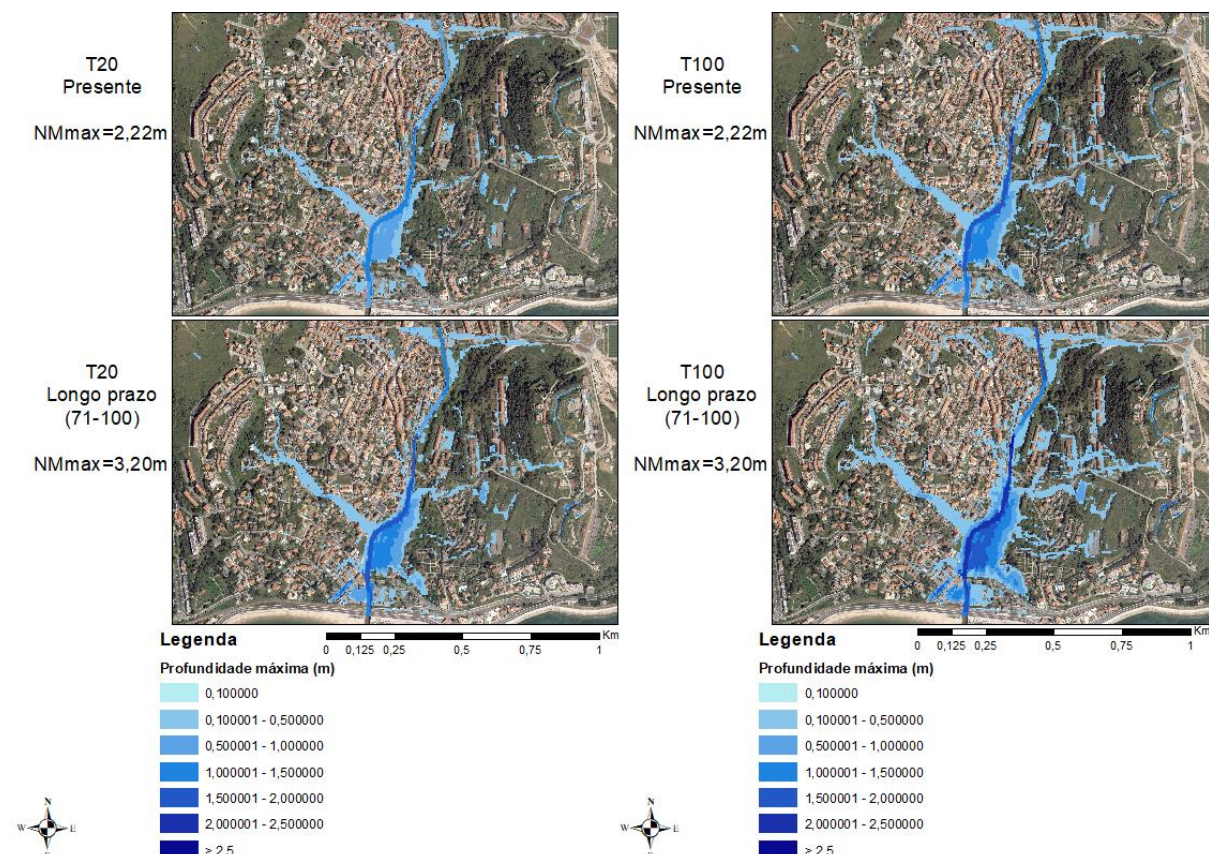


Figura III.16 – Profundidade máxima de inundação associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.

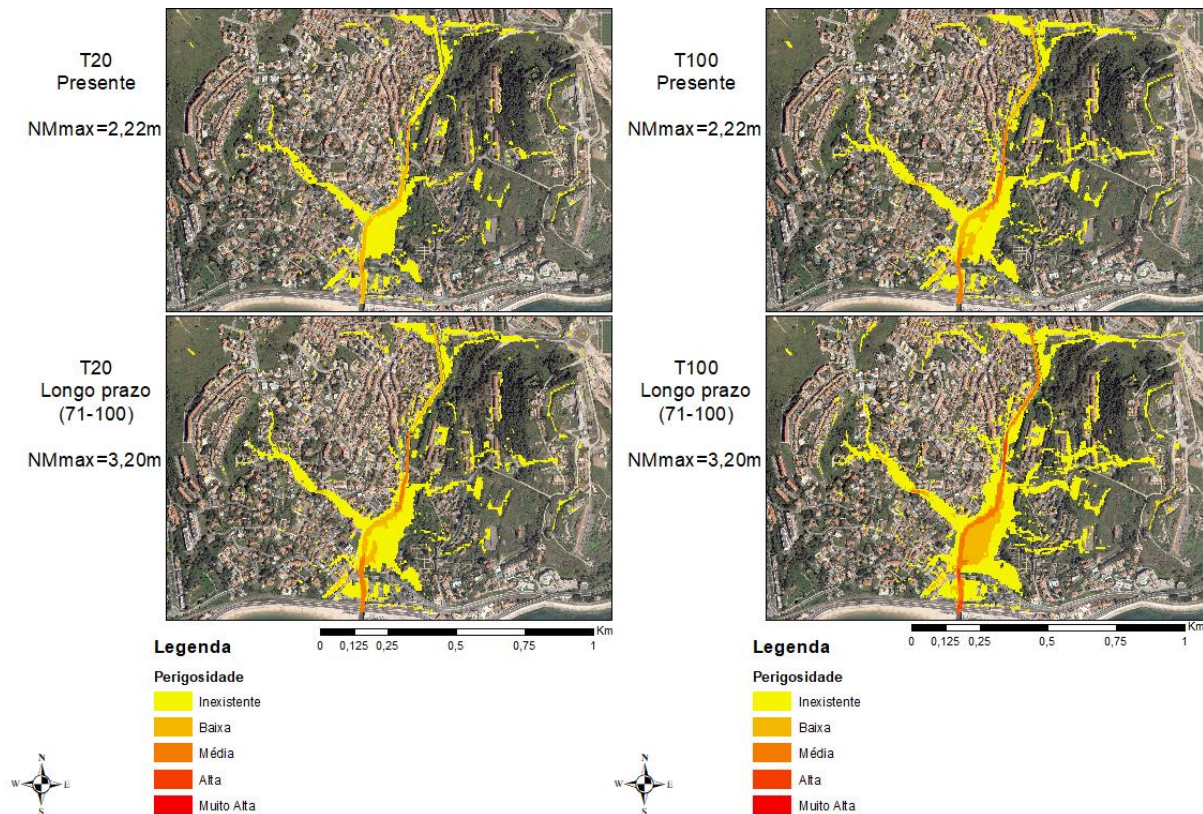


Figura III.17 – Perigosidade associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (2071-2100, baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.

Ao nível da velocidade do escoamento (ver figura III.18), e em comparação com a situação normal de forçamento oceanográfico, observam-se unicamente modificações na foz da ribeira, sendo as velocidades de escoamento menos acentuadas em prol da menor discrepância entre as alturas de água na interface rio-mar.

Para uma análise mais completa sobre os efeitos ao nível das velocidades do escoamento na interface rio-mar, examinam-se as figuras III.15 e III.18, onde é perceptível que no cenário presente, nas duas situações de forçamento oceanográfico, as velocidades do escoamento são tanto maiores quanto maior a intensidade das precipitações, uma vez que geram profundidades máximas de inundação mais elevadas, e com aparente facilidade de escoamento para o mar.

Contudo, da análise de cenários de alterações climáticas, verifica-se que em eventos de precipitação menos recorrentes as velocidades de escoamento são mais acentuadas a partir da ponte da Estrada Gibalta, local imediatamente a jusante da área de maior inundação, onde há um “estrangulamento” no escoamento vindo de montante e cujo efeito tampão é potenciado pela subida do nível do mar⁶⁸, com efeitos na expansão das áreas inundáveis.

⁶⁸ Saliente-se que para o final do século está projetada uma subida de 0,98 m no nível do mar.

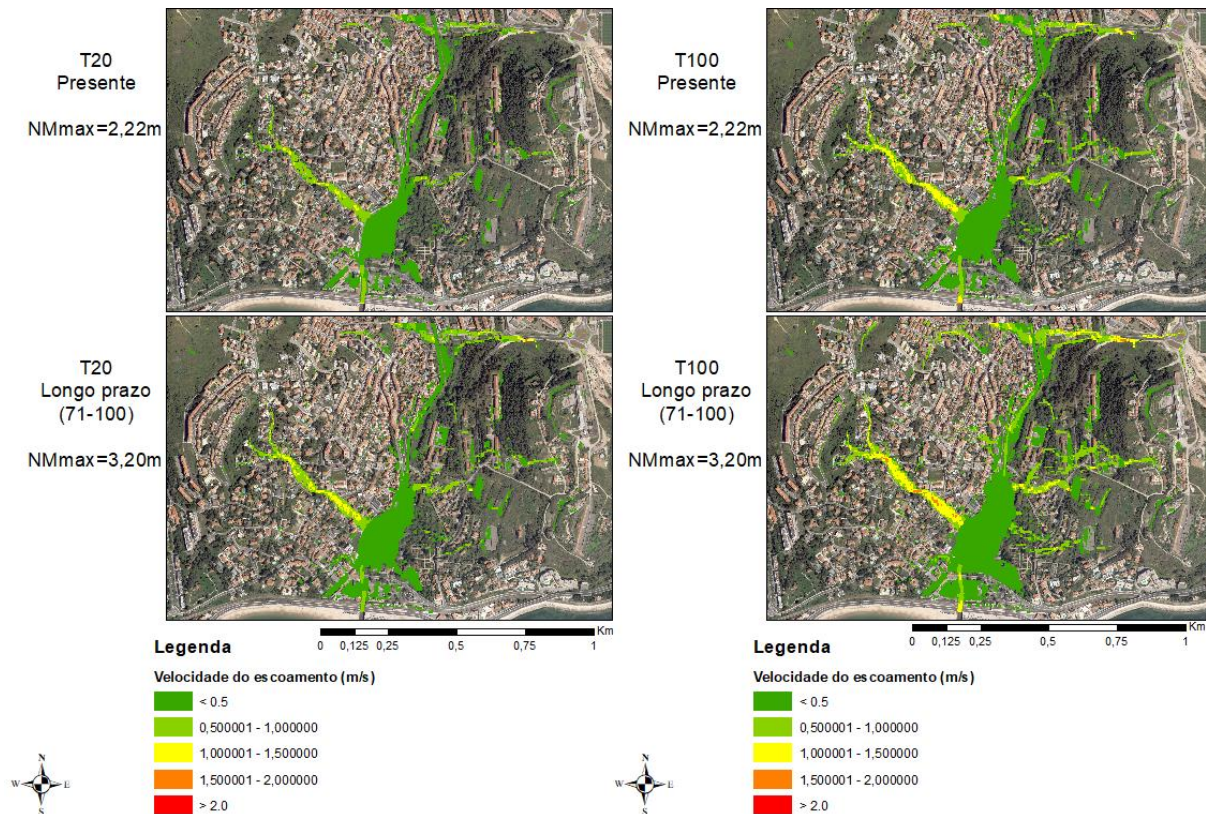


Figura III.18 – Velocidade do escoamento associada aos períodos de retorno de 20 (esquerda) e 100 anos (direita), no período atual (cima) e de longo prazo (baixo) no cenário RCP8.5, para a situação de tempestade no mar.

2.3. Enquadramento geográfico dos níveis máximos de altura de água e perigosidade

Seguidamente apresentam-se as tabelas III.3 e III.4 que dizem respeito à localização, e respetivos valores, dos máximos de altura de água e perigosidade associados a cada situação de forçamento oceanográfico, nos cenários presente e futuro de alterações climáticas, para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos. A cada registo máximo de nível de inundação está também associado o respetivo valor de perigosidade, tal como para cada registo máximo de perigosidade está associado o respetivo valor de profundidade máxima de inundação.

Como se pode verificar, da análise geográfica do nível máximo de inundação e perigosidade máxima, constata-se que as ocorrências não são coincidentes, pelo simples facto de a perigosidade ser função não só da profundidade máxima como da velocidade do escoamento registado nessa célula.

Observa-se também que os registos máximos de nível da água dão-se na mesma zona (ponto da linha de água a montante da ponte da Estrada Cartuxa, após curvatura do troço fluvial), em todos os cenários e tipos de cheias e inundação testados (pelas características topográficas, onde se observa um desnível na linha de água, conforme figura III.19).

Com exceção do período de retorno de 20 anos, no cenário atual, todas as situações de NM igual a 3,20 m refletem o máximo de perigosidade na Ponte Gibalta (na linha de água).

Também que, seja qual for a situação de forçamento oceanográfico, é nesse local que se regista a perigosidade máxima aquando ocorrência de precipitações excecionais no cenário futuro de longo prazo. Estes máximos devem-se às velocidades que aí se fazem sentir devido ao ligeiro estreitamento do canal (ver figura III.19).

Para as restantes condições de cheia e inundação analisados, a perigosidade máxima dá-se um pouco a montante dessa ponte, especificamente num ponto do canal fluvial a jusante da ponte da Estrada Cartuxa.

Tabela III.3 – Identificação do registo máximo de nível de inundação associado ao cenário presente e futuro de médio e longo prazo, para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, considerando as diferentes situações de forçamento oceanográfico analisadas.

Cenário	Forçamento oceanográfico	HC _{máx}			Valor de P em HC _{máx}
		Valor (m)	Ponto	Local	
T20	CD	1,5116	i=121; j=224	Montante da ponte Estr. Cartuxa	1,29
	NMM=0,18 m	1,5116	i=121; j=224	=	1,29
	NM _{máx} =2,22 m	1,5125	i=121; j=224	=	1,29
	NM=3,20 m	1,7291	i=121; j=224	=	1,61
T20 (41-70)	CD	1,7201	i=121; j=224	=	1,63
	NMM=0,56 m	1,7201	i=121; j=224	=	1,63
	NM _{máx} =2,60 m	1,7357	i=121; j=224	=	1,64
	NM=3,20 m	1,8175	i=121; j=224	=	1,68
T20 (71-100)	CD	1,8663	i=122; j=224	=	1,53
	NMM=1,16 m	1,8663	i=122; j=224	=	1,53
	NM _{máx} =3,20 m	1,9700	i=122; j=224	=	1,57
T50	CD	1,8193	i=122; j=224	=	1,46
	NMM=0,18 m	1,8193	i=122; j=224	=	1,46
	NM _{máx} =2,22 m	1,8200	i=122; j=224	=	1,46
	NM=3,20 m	1,9180	i=122; j=224	=	1,50
T50 (41-70)	CD	2,1190	i=122; j=224	=	1,88
	NMM=0,56 m	2,1190	i=122; j=224	=	1,88
	NM _{máx} =2,60 m	2,1233	i=122; j=224	=	1,88
	NM=3,20 m	2,1994	i=122; j=224	=	1,93
T50 (71-100)	CD	2,2423	i=122; j=224	=	2,08
	NMM=1,16 m	2,2423	i=122; j=224	=	2,08
	NM _{máx} =3,20 m	2,3093	i=122; j=224	=	2,17
T100	CD	2,0794	i=122; j=224	=	1,83
	NMM=0,18 m	2,0794	i=122; j=224	=	1,83
	NM _{máx} =2,22 m	2,0794	i=122; j=224	=	1,83
	NM=3,20 m	2,1663	i=122; j=224	=	1,88
T100 (41-70)	CD	2,4273	i=122; j=224	=	2,41
	NMM=0,56 m	2,4273	i=122; j=224	=	2,41
	NM _{máx} =2,60 m	2,4337	i=122; j=224	=	2,41
	NM=3,20 m	2,4736	i=122; j=224	=	2,41
T100 (71-100)	CD	2,5179	i=122; j=224	=	2,49
	NMM=1,16 m	2,5179	i=122; j=224	=	2,49
	NM _{máx} =3,20 m	2,5635	i=122; j=224	=	2,51

Tabela III.4 – Identificação do registo máximo de perigosidade associado ao cenário presente e futuro de médio e longo prazo, para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, considerando as diferentes situações de forçamento oceanográfico analisadas.

Cenário	Forçamento oceanográfico	P _{máx}			Valor de HC (m) em P _{máx}
		Valor	Ponto	Local	
T20	CD	1,48	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,3776
	NMM=0,18 m	1,48	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,3779
	NM _{máx} =2,22 m	1,48	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,3792
	NM=3,20 m	1,69	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6069
T20 (41-70)	CD	1,77	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,5534
	NMM=0,56 m	1,77	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,5534
	NM _{máx} =2,60 m	1,78	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,5744
	NM=3,20 m	1,84	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,6323
T20 (71-100)	CD	2,01	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6749
	NMM=1,16 m	2,01	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6749
	NM _{máx} =3,20 m	2,14	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,7254
T50	CD	1,93	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6355
	NMM=0,18 m	1,93	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6355
	NM _{máx} =2,22 m	1,93	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,6368
	NM=3,20 m	2,04	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,6942
T50 (41-70)	CD	2,45	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8723
	NMM=0,56 m	2,45	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8723
	NM _{máx} =2,60 m	2,45	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8856
	NM=3,20 m	2,60	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,8609
T50 (71-100)	CD	2,76	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,9755
	NMM=1,16 m	2,76	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,9755
	NM _{máx} =3,20 m	2,84	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,9285
T100	CD	2,38	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8413
	NMM=0,18 m	2,38	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8413
	NM _{máx} =2,22 m	2,38	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	1,8439
	NM=3,20 m	2,53	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,8406
T100 (41-70)	CD	3,15	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	2,1342
	NMM=0,56 m	3,15	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	2,1342
	NM _{máx} =2,60 m	3,15	i=95; j=222	Jusante da ponte Estr. Cartuxa	2,1416
	NM=3,20 m	3,27	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	2,0402
T100 (71-100)	CD	3,37	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,9722
	NMM=1,16 m	3,37	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	1,9726
	NM _{máx} =3,20 m	3,51	i=26; j=186	Ponte Estr. Gibalta	2,1023



Figura III.19 – Pormenor da zona montante (vermelho) e jusante (azul ciano) da ponte da estrada Cartuxa e da ponte da Estrada Gibalta (amarelo).

Capítulo IV - Conclusões

1. Respostas às perguntas de investigação

A caracterização do regime de inundação na zona crítica da bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena constitui o objetivo principal da presente dissertação.

Mediante processos de modelação hidrológica e hidráulica foi possível simular potenciais cenários de cheia, bem como obter uma cartografia de áreas inundáveis, com as respetivas projeções em termos de profundidade máxima de inundação e perigosidade associada.

Estes resultados permitem não só auxiliar a tomada de decisão e sugestão de medidas relativas ao planeamento de emergências ou prevenção, como promover um adequado ordenamento do território, de forma a reduzir potenciais efeitos nefastos em eventos desta natureza (Lopes, 2017; Martins, 2017).

Atualmente, vários elementos encontram-se expostos a inundações de elevada probabilidade de ocorrência, ainda que a perigosidade associada seja, na sua generalidade, classificada como Inexistente (ver tabela II.16) – exceção para a frente ribeirinha (na margem Oeste) e troço fluvial, onde se verificam perigosidades classificadas como Baixa e Baixa a Média, respetivamente. Não obstante, as profundidades máximas de inundação associadas a fenómenos desta magnitude trazem já implicações nas atividades e movimentos em alguns dos arruamentos, estradas, equipamentos públicos, comércio e serviços existentes, com consequências também ao nível de algumas áreas edificadas (habitação e devolutas) e não edificadas (terrenos agrícolas, entre outros).

As zonas afetadas podem subdividir-se basicamente em três grupos:

- i) zonas de grande declividade⁶⁹, que constituem na sua maioria zonas de elevada densidade urbana, e cujo grau de impermeabilidade potencia a velocidade do escoamento;
- ii) zonas de baixa declividade⁷⁰, que embora sejam caracterizadas por velocidades de escoamento inferiores, propiciam uma maior extensão da cheia. De notar que é nesta zona que os efeitos da subida do nível do mar se fazem sentir, face à topografia caracterizada por cotas baixas e proximidade à foz; e
- iii) zonas cujas características topográficas proporcionam a ocorrência de inundações mais pequenas e/ou pontuais.⁷¹

Ainda que no presente as áreas mais afetadas tendam a manter-se aquando episódios de inundação de média probabilidade de ocorrência, verifica-se um incremento generalizado no perímetro da inundação, bem como da profundidade máxima de inundação e nível de perigosidade.

⁶⁹ Fazem parte: o Largo Alves Redol, a Rua Bernardim Ribeiro, parte da Rua Vasco da Gama e Rua Afonso de Albuquerque; a Avenida Croft de Moura e Avenida Gomes Freire, um pouco mais a Sul; e a envolvente Oeste da estrada Gibalta, especificamente a Rua Mauperrin Santos. Outras zonas caracterizadas com alguma declividade são as localizadas na área Norte da zona crítica e Nordeste da Quinta Real de Caxias, que ainda não sendo tão afetadas merecem já especial atenção.

⁷⁰ Integram essencialmente áreas onde a ribeira de Barcarena extravasa, nomeadamente na margem Este (com a área inundável mais significativa) que engloba praticamente a totalidade do terreno baldio contíguo, alguns dos caminhos pedonais e edifícios existentes na Quinta Real de Caxias e Cascata dos Jardins da Quinta Real de Caxias e parte dos edifícios e respetivos acessos do terreno localizado imediatamente a Este; na margem Oeste, que constitui a frente ribeirinha; e a envolvente a Sul da ponte da Estrada Gibalta, em ambas as margens.

⁷¹ Incidência mais pronunciada no lado Este da zona em estudo, de menor densidade urbana.

Tendo a precipitação um forte contributo nos processos de cheia e inundação analisados, é expectável que o aumento de precipitação existente entre os períodos de retorno (e intervalos temporais) se reflita nos atributos referidos.

Da análise dos hietogramas de projeto, verifica-se também que a precipitação do período de retorno de 20 anos se aproxima progressivamente ao longo do século dos valores de precipitação associados ao período de retorno de 100 anos no cenário presente, por conseguinte, também a extensão da área inundável assume um padrão espacial análogo.

No que diz respeito a cenários futuros de alterações climáticas, estão projetados incrementos na frequência e intensidade das precipitações, com repercussões ao nível da profundidade máxima de inundação, perigosidade e perímetro inundável.

Estes impactos fazem-se sentir de forma mais agravada em fenómenos extremos de precipitação (período de retorno de 100 anos), na situação futura de longo prazo, onde são projetadas perigosidades classificadas como Altas no leito da ribeira (nas proximidades da ponte da Estrada da Cartuxa e Estrada Gibalta); perigosidades classificadas como Médias em grande parte do canal fluvial, na frente ribeirinha, em parte da margem Este da linha de água e na Rua Vasco da Gama; e perigosidades classificadas como Baixas em situações pontuais no tecido urbano (algumas das quais não atingidas na atualidade nem no período de retorno de 20 anos em cenário futuro de alterações climáticas), bem como na Estrada da Cartuxa, junto ao Largo da Cartuxa (vulnerável apenas em fenómenos climáticos desta magnitude).

Embora as precipitações apresentem um maior peso nos processos de cheia e inundação, constata-se que os efeitos do forçamento oceanográfico incidem de forma mais acentuada nos terrenos contíguos à linha de água existentes na margem Este, cujos níveis de perigosidade não representam impactos significativos à população, não obstante constituírem zonas de interesse cultural e paisagístico.

Verifica-se também que situações de tempestade do mar induzem diferenças pouco significativas ao nível de perímetro inundável, com situações pontuais de expansão, quando comparado com uma situação normal de forçamento oceanográfico. No que diz respeito à profundidade máxima da inundação e nível de perigosidade, as alterações que se dão em alguns pontos da linha de água e zona circundante são, também, de expressividade pouco significativa.

Da análise de cenários futuros, observa-se uma diminuição progressiva na resposta da subida do nível do mar desde o momento presente até ao cenário de longo prazo, que se projetam tanto mais fortes quanto menor o período de retorno analisado.

No entanto, ainda que os contributos do forçamento oceanográfico sejam pouco significativos, para os valores testados, os seus efeitos fazem-se sentir de forma gradual a partir de NM igual a 2,22 m.

Deve-se referir que estas projeções e/ou conclusões se baseiam num modelo bidimensional de alta resolução, cujos processos de calibração constituem resultados estatisticamente satisfatórios. Da comparação entre os modelos hidrológicos 2D e 3D verificam-se diferenças pouco significativas, justificáveis em parte pela quantidade de dados históricos obtidos, não obstante qualquer processo de modelação constituir uma simplificação dos processos representativos da zona em estudo.

2. Limites e críticas ao estudo

Face à complexidade dos processos de modelação e ao carácter interdisciplinar da presente dissertação, importa inventariar as diferentes limitações do estudo ou outros aspetos considerados relevantes neste contexto.

Como facilmente se compreende, a principal limitação cinge-se à impossibilidade de desenvolver um modelo que pudesse ser calibrado e validado diretamente na bacia hidrográfica da ribeira de Barcarena, não obstante apresentar condições edafoclimáticas semelhantes à bacia hidrográfica do rio Jamor.

Aliam-se as incertezas inerentes a qualquer processo de modelação, nomeadamente aqueles com períodos de calibração/validação relativamente curtos.

As fontes de incerteza vão desde a subjetividade intrínseca à parametrização do modelo, que depende não só da interpretação dos processos, como dos dados de base adquiridos – e cuja confiança/credibilidade dos resultados pode ser avaliada por meio dos indicadores estatísticos aplicados neste trabalho – até à qualidade e quantidade da informação de base. Salientam-se, a dimensão da série histórica de dados meteorológicos e hidrométricos; a incerteza associada aos caudais observados, calculados mediante utilização da curva de vazão de Manning-Strickler; a incerteza inerente às projeções de cenários futuros de alterações climáticas; a não representação da variabilidade espacial da precipitação; e a não consideração de alterações do uso e ocupação do solo ou medidas de mitigação que possam eventualmente vir a ser implementadas, na análise de cheias e inundações futuras.

Como descrito nos capítulos II e III, aquando a análise de situações de forçamento oceanográfico não nulos considerou-se a imposição de um valor constante de nível do mar como condição de fronteira a jusante, não tendo sido indagados os efeitos da situação extrema de forçamento oceanográfico para cenários futuros de longo prazo, face às limitações temporais subjacentes a uma tese desta natureza.

Também, as cheias e inundações projetadas para cenários futuros têm por base apenas o cenário de concentrações de gases com efeito de estufa RCP8.5, pelo motivo supramencionado, mas sustentado pelo facto de constituir o cenário mais grave.

O mesmo com a não análise de inundações de baixa probabilidade de ocorrência (conforme o disposto no Decreto-lei n.º 115/2010, de 22 de outubro), em resultado do investimento temporal subjacente à realização dos trabalhos necessários.

Deve-se referir que o argumento de que há ainda algumas incertezas nas projeções, quer ao nível das alterações climáticas quer das inundações aqui abordadas, não deve desmotivar a implementação de ações de gestão/adaptação desta problemática, em detrimento da segurança de cidadãos e bens conexos à zona costeira estudada.

3. Investigações e desenvolvimentos futuros

Embora o presente estudo contribua para uma mais ampla implementação da Diretiva 2007/60/CE e constitua um complemento ao disposto no PMAACO (especificamente no que concerne às cheias e inundações rápidas), as recomendações para futuras investigações incidem, essencialmente, na pertinência do tema, que permite aprofundar determinados aspetos, bem como nas limitações identificadas no decurso desta tese.

Neste sentido, considera-se complexiva a análise mais alargada do efeito da variação do nível do mar nas cheias e inundações, com ensaio de um maior número de valores, incluindo aqueles que constituem uma situação extrema de forçamento oceanográfico para a situação futura de longo prazo (valores de NM superiores a 3,20 m).

Também, a replicabilidade dos processos de modelação por inclusão de outros cenários com comportamentos distintos de emissões de gases com efeito de estufa (RCP2.6, RCP4.5 e RCP6.0)

permite integrar uma maior exposição da problemática das cheias e inundações na zona costeira em estudo.

Destaca-se também, a propósito do previsto no Decreto-lei n.º 115/2010, de 22 de outubro, a necessidade de avaliar o regime de inundação associado a períodos de retorno superiores a 100 anos (i.e., inundação de baixa probabilidade de ocorrência), bem como proceder à avaliação do risco de cheias e inundações, atual e futuro, com elaboração da respetiva cartografia e proposta de orientações estratégicas ou medidas de adaptação/mitigação dos efeitos nefastos.

Para além disso, afigura-se um estudo propício a caracterização do regime de inundações na zona de Agualva/Cacém (parte integrante da BHRB), face ao seu histórico de ocorrências, a despeito de não contabilizar qualquer efeito de forçamento oceanográfico em prol da sua localização.

Refere-se, inclusivamente, a viabilidade da metodologia aplicada na presente dissertação na elaboração cartográfica de zonas inundáveis em linhas de água próximas da BHRB (que não tenham ainda publicado o estudo para cenários futuros de alterações climáticas) ou outras linhas fluviais inseridas em bacias hidrográficas de pequenas dimensões, bem como a exequibilidade do modelo desenvolvido em representar os processos hidrodinâmicos de bacias com características edafoclimáticas semelhantes.

Por fim, a título de curiosidade, seria um desafio interessante considerar as configurações de modelo 3D calibrado nos processos de modelação de cheias e inundação na zona em estudo do presente trabalho, de forma a possibilitar a comparação de resultados, ainda que estes processos constituam tempos de computação substancialmente superiores.

Referências bibliográficas

(As citações da presente dissertação seguem o estilo Elsevier - Harvard)

- Action Modulers, 2016. No Title [WWW Document]. URL <http://www.actionmodulers.com/products/mstudio/models/pms-m-mland.shtml> (accessed 9.10.18).
- Action Modulers, 2013. Urban Floods - Final report on numerical modeling of urban floods in 4 Portuguese cities.
- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R., Freitas, M. da C., 2006. CAP04-Zonas Costeiras, in: Santos, F.D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas Em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*. Projecto SIAM II. Gradiva - Publicações, Lda., Lisboa, pp. 169–208.
- Antunes, C., 2016. Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual, in: 4ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, pp. 21–24.
- Antunes, C., 2014. A subida do NMM e a necessidade de revisão dos referenciais verticais, in: 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Liboa, pp. 1–4.
- Antunes, C., 2012. Implicação da subida do NMM na necessidade de revisão dos sistemas de referência verticais, in: 3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada, LNEC. Lisboa, pp. 1–6.
- Antunes, C., Taborda, R., 2009. Sea level at Cascais tide gauge: Data, analysis and results. *J. Coast. Res.* 218–222.
- APA, 2020. APA - Agência Portuguesa do Ambiente [WWW Document]. URL <https://apambiente.pt/>
- APA, AQUALOGUS, Action Modulers, 2014. Elaboração de cartografia específica sobre o risco de inundação para Portugal Continental - Relatório Final - Volume 1: Memória Descritiva.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 55, 1491–1508.
- Arquivo - Câmara Municipal de Oeiras, n.d. No Title [WWW Document]. URL <http://arquivo.cm-oeiras.pt/> (accessed 11.12.18).
- Beraza, A.M.E., 2015. Modelización de procesos hidrológicos y de contaminación por nitratos mediante dos códigos numéricos (SWAT y MOHID). *Cuenca agrícola del río Alegria (País Vasco)*. Universidad del País Vasco & Euskal Herriko Unibertsitatea.
- Bernard-Jannin, L., Brito, D., Xiaoling, S., Jauch, E., Neves, R., Sauvage, S., 2016. Spatially distributed modelling of surface water-groundwater exchanges during overbank flood events – a case study at the Garonne River. *Adv. Water Resour.* 94, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.008>
- Blanco, G., Gerlagh, R., Suh, S., Barrett, J., Coninck, H.C. de, Morejon, C.F.D., Mathur, R., Nakicenovic, N., Ahenkora, A.O., Pathak, J.P.H., Rice, J., Richels, R., Smith, S.J., Stern, D.I., Toth, F.L., Zhou, P., 2014. Drivers, Trends and Mitigation, in: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C.M. (Ed.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 351–412. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416.011>

- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale Issues in Hydrological Modeling. *Hydrol. Process.* 9, 251–290. <https://doi.org/10.1029/96eo00131>
- Brandão, C., Rodrigues, R., da Costa, J.P., 2001. *Análise de Fenómenos Extremos - Precipitações Intensas em Portugal Continental*. Lisboa.
- Braunschweig, F., Brito, D., Fernandes, L., 2016. MOHID Studio Quick Start Guide for Mohid Land - User Guide for setting up MOHID Land Projects with MOHID Studio Professional Edition.
- Braunschweig, F., Leitao, P.C., Fernandes, L., Pina, P., Neves, R.J.J., 2004. The object oriented design of the integrated water modelling system MOHID. *Dev. Water Sci.* 55, 1079–1090. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(04\)80126-6](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(04)80126-6)
- Brito, D., Campuzano, F.J., Sobrinho, J., Fernandes, R., Neves, R., 2015. Integrating operational watershed and coastal models for the Iberian Coast: Watershed model implementation - A first approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 167, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.10.022>
- Brito, D., Neves, R., Branco, M.A., Gonçalves, M.C., Ramos, T.B., 2017. Modeling flood dynamics in a temporary river draining to an eutrophic reservoir in southeast Portugal. *Environ. Earth Sci.* 76, 377. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6713-7>
- Buta, C., Mihai, G., Stănescu, M., 2018. Flash floods simulation in a small drainage basin using HEC-RAS hydraulic model. *Ovidius Univ. Ann. Constanta - Ser. Civ. Eng.* 19, 101–118. <https://doi.org/10.1515/ouacsce-2017-0009>
- Câmara Municipal de Oeiras, 2011a. Estudo Hidrológico e Hidráulico das bacias Hidrográficas de Oeiras para elaboração de carta de zonas inundáveis de acordo com Decreto-Lei n.º 115/2010. Volume 4: Caracterização hidrológica e hidráulica das cheias na ribeira de Barcarena.
- Câmara Municipal de Oeiras, 2011b. Estudo Hidrológico e Hidráulico das bacias Hidrográficas de Oeiras para elaboração de carta de zonas inundáveis de acordo com Decreto-Lei n.º 115/2010. - Volume 3: Caracterização hidrológica e hidráulica das cheias no rio Jamor.
- Câmara Municipal de Oeiras, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011. Relatório de Caracterização e Diagnóstico - Plano de Pormenor da Margem Direita da Foz do Rio Jamor.
- Câmara Municipal de Sintra, 2014. Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Sintra.
- Chow, V. Te, 1959. *Open Channel Hydraulics*, Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6857-6.X5000-0>
- Chow, V. Te, Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*, The Accounting Review. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Ciscar, J.C., Feyen, L., Soria, A., Lavalle, C., Raes, F., Perry, M., Nemry, F., Demirel, H., Rozsai, M., Dosio, A., Donatelli, M., Srivastava, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Shrestha, S., Ciaian, P., Himics, M., Van Doorslaer, B., Barrios, S., Ibáñez, N., Forzieri, G., Rojas, R., Bianchi, A., Dowling, P., Camia, A., Libertà, G., San Miguel, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Barredo, J.I., Paci, D., Pycroft, J., B., S., Van Regemorter, D., Revesz, T., Vandyck, T., Vrontisi, Z., Baranzelli, C., Vandecasteele, I., Batista e Silva, F., Ibarreta, D., 2014. Climate Impacts in Europe: The JRC PESETA II Project, JRC Scientific and Policy Reports.
- Cotter, A.S., Chaubey, I., Costello, T.A., Soerens, T.S., Nelson, M.A., 2003. Water quality model output uncertainty as affected by spatial resolution of input data. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39, 977–986. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04420.x>
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters), UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), 2015. The human cost of weather-related disasters 1995-2015.
- Cunha, L.V., Ribeiro, L., Oliveira, R.P., Nascimento, J., 2006. CAP03-Recursos Hídricos, in: Santos, F.D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas Em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*. Projecto SIAM II. Gradiva - Publicações, Lda., Lisboa, pp. 115–168.

- da Silva, M.G., Netto, A. de O. de A., Neves, R.J. de J., Vasco, A.N., Almeida, C., Faccioli, G.G., 2015. Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil. *J. Environ. Prot. (Irvine,. Calif)*. 06, 837–850. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.68076>
- da Silva Tavares, L.P., Lugon Junior, J., Silva, J.A.F., Wasserman, C., Rodrigues, P.P.G.W., 2018. Water management and urban flood mitigation: Studies and proposals for the Macaé river basin in Brazil. *J. Urban Environ. Eng.* 12, 188–200.
- Dias, J.M.A., Taborda, R.P.M., 1988. Evolução recente do nível médio do mar em Portugal, in: *Anais Do Instituto Hidrográfico* N°9. pp. 83–97.
- Dias, L., 2016. As Alterações Climáticas, as Inundações e a Cidade - Contributos para o estudo da resiliência urbana em situações de chuva torrenciais. Universidade de Lisboa.
- Dias, L.F., Ferreira, A.M., Aparício, B., Santos, F.D., 2019. Plano de Adaptação às Alterações Climáticas de Oeiras - Tomo 1: Plano. Câmara Municipal de Oeiras.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., Llorente Isidro, M., 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- EEA (European Environment Agency), 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 - An indicator-based report.
- Ernst, J., Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M., 2010. Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Nat. Hazards* 55, 181–209. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y>
- Feddes, R., Kowalik, P., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield, *Simulation Monographs* Pudoc. Wageningen. <https://doi.org/10.1097/00010694-198003000-00016>
- Ferreira, A.M.P.J., 2000. Caracterização de Portugal Continental. Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional. *Lneg* 19–61.
- Gaspar, T.C. de F., 2013. Modelos de apoio à decisão para gestão de riscos de cheias em bacias hidrográficas urbanizadas. Instituto Superior Técnico.
- Ghaffari, G., 2011. *Environmental Sciences. Res. J. Environ. Sci.* 5, 691–702. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.691.702>
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., Rudra, R., 2014. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology* 1, 20–39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>
- Hov, Ø., Cubasch, U., Fischer, E., Höppe, P., Iversen, T., Kvamstø, N.G., Kundzewicz, Z.W., Rezacova, D., Rios, D., Santos, F.D., Schädler, B., Veisz, O., Zerefos, C., Benestad, R., Murlis, J., Donat, M., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2013. *Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation*. Banson production, Cambridge, CB1 2BH, UK.
- InterAcademy Council, 2010. Climate Change Assessment - Review of the processes and procedures of the IPCC, Copenhagen Consensus. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Change Climate, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1256/wea.58.04>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)

- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000. *Special report on Emissions Scenarios, A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Jenkins, K., Surminski, S., Hall, J., Crick, F., 2016. Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: An agent-based model approach (No. 252 e 223).
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.* 31, 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Leal, M.H.A., 2011. *As cheias rápidas em bacias hidrográficas da AML Norte: Factores condicionantes e desencadeantes*. Universidade de Lisboa - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.
- Lopes, J.P.P., 2017. *Modelação hidrológica das bacias hidrográficas de Monte Novo e Vigia em cenários de alterações climáticas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- MARETEC - Marine Environment & Technology Center, 2019. No Title [WWW Document]. URL <http://www.maretec.org/> (accessed 10.3.18).
- Martins, M.M.C., 2017. *O risco de cheias na cidade de Amarante: Cartografia de áreas inundáveis recorrendo à modelação hidráulica*. Faculdade de Letras da Universidade do Porto.
- Miranda, P.M.A., Valente, M.A., Tomé, A.R., Trigo, R., Coelho, M.F.E.S., Aguiar, A., Azevedo, E.B., 2006. CAP02- O clima de Portugal nos séculos XX e XXI, in: Santos, F.D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas Em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II*. Gradiva - Publicações, Lda., Lisboa, pp. 45–113.
- MOHID Wiki, 2018. No Title [WWW Document].
- Morais, I., Nunes, J.P., Pastor, A., Dias, L., Ferreira, A., Braunschweig, F., 2019. *Plano de Adaptação às Alterações Climáticas de Oeiras - Relatório Setorial: Recursos Hídricos*. Câmara Municipal de Oeiras.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W. Van, Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed simulations 50, 885–900.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., Daggupati, P., 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans. ASABE* 58, 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Most, H. van der, Marchand, M., 2017. *Selecting Measures and Designing Strategies for Integrated Flood Management - A guidance document*.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12.
- Munich Re, 2019. No Title [WWW Document]. URL <https://www.munichre.com/en/homepage/index.html> (accessed 8.22.19).
- Munich Re, 2018. *Topics Geo: Natural Catastrophes 2017 - Analyses, assessments, positions* 70.
- Munich Re, 2017. *Topics Geo 2016: Natural catastrophes 2016 - Analyses, assessments, positions* 80.
- Nunes, J.P.C., 2007. *Vulnerability of Mediterranean watersheds to climate change: the desertification context*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., Aronica, G.T., 2016. Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Nat. Hazards* 83, 117–132. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2382-1>
- Portela, M.M., 2006. Estimação de precipitações intensas em bacias hidrográficas de Portugal Continental. *Assoc. Port. Dos Recur. Hídricos* 27, 15–32.
- Ramos, C., Reis, E., 2001. As cheias no Sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. *Finisterra* 36, 61–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.18055/Finis1648>
- Ramos, T., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Pires, F., Pereira, L.S., 2011. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. *Rev. Ciências Agrárias* 252–264.
- Ribeiro, C.P.C., 2017. Alterações climáticas e planeamento: subida do nível médio do mar e inundações na Baixa Pombalina. Faculdade de Ciencias e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318–333.
- Rocha, C.S., 2016. Estudo e análise da vulnerabilidade costeira face a cenários de subida do nível médio do mar e eventos extremos devido ao efeito das alterações climáticas. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Sangati, M., Borga, M., Rabuffetti, D., Bechini, R., 2009. Influence of rainfall and soil properties spatial aggregation on extreme flash flood response modelling: An evaluation based on the Sesia river basin, North Western Italy. *Adv. Water Resour.* 32, 1090–1106. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.12.007>
- Santos, C.A.S., Almeida, C., Ramos, T.B., Rocha, F.A., Oliveira, R., Neves, R., 2018. Using a Hierarchical Approach to Calibrate SWAT and Predict the Semi-Arid Hydrologic Regime of Northeastern Brazil. *Water* 10, 17. <https://doi.org/10.3390/w10091137>
- Santos, F.D., 2006. CAP01-Problemas das Alterações Climáticas no Início do Sec. XXI .pdf, in: Santos, F. D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas Em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II*. Gradiva - Publicações, Lda., Lisboa, pp. 17–43.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R., 2017. Grupo de Trabalho do Litoral: Gestão da Zona Costeira: O desafio da mudança. Lisboa.
- Santos, P.M.P., 2015. Cheias e inundações: Avaliação, impactos e instrumentos para a gestão do risco. Universidade de Lisboa - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Superlative Numbers, L., 2019. Modelação hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Jamor - Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas da C.M. de Oeiras.
- Taborda, R., Andrade, C., Ferreira, A., 2019. Plano de Adaptação às Alterações Climáticas de Oeiras - Relatório Setorial: Orla Ribeirinha. Câmara Municipal de Oeiras.
- Telles, W.R., Rodrigues, P.P.G.W., Silva Neto, A.J., 2017. Calibração automática da plataforma MOHID empregando um método estocástico de otimização e dados reais de um evento climático extremo em Nova Friburgo-RJ: parte 2 – análise de sensibilidade e estimativa de parâmetros hidrológicos. *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.* 33, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.04.005>
- Temez Pelaez, J.R., 1978. *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo, Direccion General de Carreteras.
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., Hengl, T., 2017. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrol. Process.* 31, 2662–2666. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>
- Trigo, R., Osborn, T.J., Corte-Real, J., 2002. Influência da oscilação do Atlântico Norte no clima do continente europeu e no caudal dos rios ibéricos atlânticos. *Finisterra* 37, 5–31. <https://doi.org/10.18055/finis1606>

- Van der Sande, C.J., de Jong, S.M., de Roo, A.P.J., 2003. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 4, 217–229. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00003-5)
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Veitzer, S.A., Gupta, V.K., 2001. Statistical self-similarity of width function maxima with implications to floods. *Adv. Water Resour.* 24, 955–965. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00030-6)
- Verwey, A., Kerblat, Y., Chia, B., 2017. Flood Risk Management at River Basin Scale: The need to adopt a proactive approach (No. Report: 116340; Volume: 1). Washington, DC.
- Willems, P., Vrac, M., 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *J. Hydrol.* 402, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.030>
- Xia, J., Falconer, R.A., Lin, B., Tan, G., 2011. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods. *Environ. Model. Softw.* 26, 987–998. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.017>
- Zhang, D., Lin, Q., Chen, X., Chai, T., 2019. Improved curve number estimation in SWAT by reflecting the effect of rainfall intensity on runoff generation. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11010163>

Anexos

Anexo 1 – Curvas de vazão da Estação Hidrométrica Senhora da Rocha (21B/04H)

Curva	Troço	Curva $Q=a \times (h-h_0)^b$	Critérios de Validade					Origem
			De:	A:	H0	Hmin	Hmax	
1	1	$Q = 5.36598 \times (h - 1.21)^{1.2353}$	01/10/1988	25/11/1989	1.21	1.21	1.85	DRAOT
2	1	$Q = 6.70165 \times (h - 1.15)^{1.84791}$	26/11/1989	30/04/1991	1.15	1.15	1.6	DGRN
3	1	$Q = 58.492 \times (h - 1.261)^{3.846}$	01/10/2010	30/09/2011	1.261	1.261	1.65	Autoridade Nacional da Água

Legenda:

Q Caudal (m³/s).

h Altura hidrométrica (m).

a e b Parâmetros da curva de vazão.

h0 Altura hidrométrica para a qual se anula o caudal.

Hmin Altura hidrométrica mínima de aplicação da curva/troço.

Hmax Altura hidrométrica máxima de aplicação da curva/troço.

Fonte: SNIRH

Anexo 2 – GROWTH_DATABASE (ficheiro .dat)

<begingrowthdatabase>

VEGETATION_ID	: 0
PLANT_TYPE	: 0
NAME	: NoVeg
BIOMASS_ENERGY_RATIO	: 0.0
OPTIMAL_HARVEST_INDEX	: 0.0
LAI_MAX	: 0.0
GROWFRACTION_1	: 0.0
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1	: 0.0
GROWFRACTION_2	: 0.0
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2	: 0.0
GROWFRACTION_LAIDECLINE	: 0.0
CANOPY_HEIGHT_MAX	: 0.0
ROOT_DEPTH_MAX	: 0.0
OPTIMAL_TEMPERATURE	: 0.0
BASE_TEMPERATURE	: 0.0
YELD_NITROGENFRACTION	: 0.0
YELD_PHOSPHORUSFRACTION	: 0.0
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1	: 0.0
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2	: 0.0
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3	: 0.0
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1	: 0.0
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2	: 0.0
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3	: 0.0
MINIMUM_HARVEST_INDEX	: 0.0
RUE_DECLINE_RATE	: 0.0
CO2_HIGH	: 0.0
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH	: 0.0
LAI_MIN_DORMANCY	: 0.0
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY	: 0.0
RADIATION_EXTINCTION_COEF	: 0.0

<endgrowthdatabase>

<begingrowthdatabase>

VEGETATION_ID	: 3
NAME	: AGRC
PLANT_TYPE	: 5
BIOMASS_ENERGY_RATIO	: 30
OPTIMAL_HARVEST_INDEX	: 0.4
LAI_MAX	: 4
GROWFRACTION_1	: 0.05
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1	: 0.05
GROWFRACTION_2	: 0.45
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2	: 0.95
GROWFRACTION_LAIDECLINE	: 0.5
CANOPY_HEIGHT_MAX	: 0.9
ROOT_DEPTH_MAX	: 1.3
OPTIMAL_TEMPERATURE	: 18

BASE_TEMPERATURE	: 0
YELD_NITROGENFRACTION	: 0.025
YELD_PHOSPHORUSFRACTION	: 0.0022
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1	: 0.0663
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2	: 0.0255
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3	: 0.0148
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1	: 0.0053
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2	: 0.002
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3	: 0.0012
MINIMUM_HARVEST_INDEX	: 0.2
RUE_DECLINE_RATE	: 6
CO2_HIGH	: 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH	: 39
LAI_MIN_DORMANCY	: 0
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY	: 0
RADIATION_EXTINCTION_COEF	: 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY	: -99
TREE_MAXIMUMBIOMASS	: -99
<endgrowthdatabase>	
<begingrowthdatabase>	
VEGETATION_ID	: 7
NAME	: FRSD
PLANT_TYPE	: 7
BIOMASS_ENERGY_RATIO	: 15
OPTIMAL_HARVEST_INDEX	: 0.76
LAI_MAX	: 5
GROWFRACTION_1	: 0.05
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1	: 0.05
GROWFRACTION_2	: 0.4
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2	: 0.95
GROWFRACTION_LAIDECLINE	: 0.1
CANOPY_HEIGHT_MAX	: 6
ROOT_DEPTH_MAX	: 3.5
OPTIMAL_TEMPERATURE	: 30
BASE_TEMPERATURE	: 10
YELD_NITROGENFRACTION	: 0.0015
YELD_PHOSPHORUSFRACTION	: 0.0003
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1	: 0.006
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2	: 0.002
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3	: 0.0015
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1	: 0.0007
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2	: 0.0004
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3	: 0.0003
MINIMUM_HARVEST_INDEX	: 0.01
RUE_DECLINE_RATE	: 8
CO2_HIGH	: 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH	: 16
LAI_MIN_DORMANCY	: 0.75

```

BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY      : 0.3
RADIATION_EXTINCTION_COEF           : 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY                : 0
TREE_MAXIMUMBIOMASS                 : -99
EVERGREEN                           : 1
<endgrowthdatabase>

<begingrowthdatabase>
VEGETATION_ID                        : 12
NAME                                 : PAST
PLANT_TYPE                           : 6
BIOMASS_ENERGY_RATIO                : 35
OPTIMAL_HARVEST_INDEX               : 0.9
LAI_MAX                              : 4
GROWFRACTION_1                      : 0.05
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1            : 0.05
GROWFRACTION_2                      : 0.49
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2            : 0.95
GROWFRACTION_LAIDECLINE              : 0.99
CANOPY_HEIGHT_MAX                   : 0.5
ROOT_DEPTH_MAX                      : 2
OPTIMAL_TEMPERATURE                  : 25
BASE_TEMPERATURE                     : 12
YELD_NITROGENFRACTION               : 0.0234
YELD_PHOSPHORUSFRACTION             : 0.0033
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1         : 0.06
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2         : 0.0231
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3         : 0.0134
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1       : 0.0084
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2       : 0.0032
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3       : 0.0019
MINIMUM_HARVEST_INDEX               : 0.9
RUE_DECLINE_RATE                    : 10
CO2_HIGH                            : 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH           : 36
LAI_MIN_DORMANCY                    : 0
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY      : 0
RADIATION_EXTINCTION_COEF           : 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY                : -99
TREE_MAXIMUMBIOMASS                 : -99
<endgrowthdatabase>

<begingrowthdatabase>
VEGETATION_ID                        : 15
NAME                                 : RNGE
PLANT_TYPE                           : 6
BIOMASS_ENERGY_RATIO                : 34
OPTIMAL_HARVEST_INDEX               : 0.9
LAI_MAX                              : 2.5
GROWFRACTION_1                      : 0.05

```

```

OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1      : 0.1
GROWFRACTION_2                : 0.25
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2      : 0.7
GROWFRACTION_LAIDECLINE       : 0.35
CANOPY_HEIGHT_MAX             : 1
ROOT_DEPTH_MAX                : 2
OPTIMAL_TEMPERATURE           : 25
BASE_TEMPERATURE               : 12
YELD_NITROGENFRACTION         : 0.016
YELD_PHOSPHORUSFRACTION       : 0.0022
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1   : 0.02
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2   : 0.012
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3   : 0.005
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1 : 0.0014
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2 : 0.001
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3 : 0.0007
MINIMUM_HARVEST_INDEX         : 0.9
RUE_DECLINE_RATE              : 10
CO2_HIGH                      : 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH     : 39
LAI_MIN_DORMANCY              : 0.75
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY : 0
RADIATION_EXTINCTION_COEF     : 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY          : -99
TREE_MAXIMUMBIOMASS           : -99
EVERGREEN                     : 1
<endgrowthdatabase>

<begingrowthdatabase>
VEGETATION_ID                 : 16
NAME                          : RNGB
PLANT_TYPE                    : 6
BIOMASS_ENERGY_RATIO          : 34
OPTIMAL_HARVEST_INDEX         : 0.9
LAI_MAX                       : 2
GROWFRACTION_1                : 0.05
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1      : 0.1
GROWFRACTION_2                : 0.25
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2      : 0.7
GROWFRACTION_LAIDECLINE       : 0.35
CANOPY_HEIGHT_MAX             : 1
ROOT_DEPTH_MAX                : 2
OPTIMAL_TEMPERATURE           : 25
BASE_TEMPERATURE               : 12
YELD_NITROGENFRACTION         : 0.016
YELD_PHOSPHORUSFRACTION       : 0.0022
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1   : 0.02
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2   : 0.012
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3   : 0.005

```

```

OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1      : 0.0014
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2      : 0.001
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3      : 0.0007
MINIMUM_HARVEST_INDEX               : 0.9
RUE_DECLINE_RATE                     : 10
CO2_HIGH                            : 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH           : 39
LAI_MIN_DORMANCY                     : 0.75
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY       : 0
RADIATION_EXTINCTION_COEF           : 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY                : -99
TREE_MAXIMUMBIOMASS                 : -99
EVERGREEN                           : 1
<endgrowthdatabase>

```

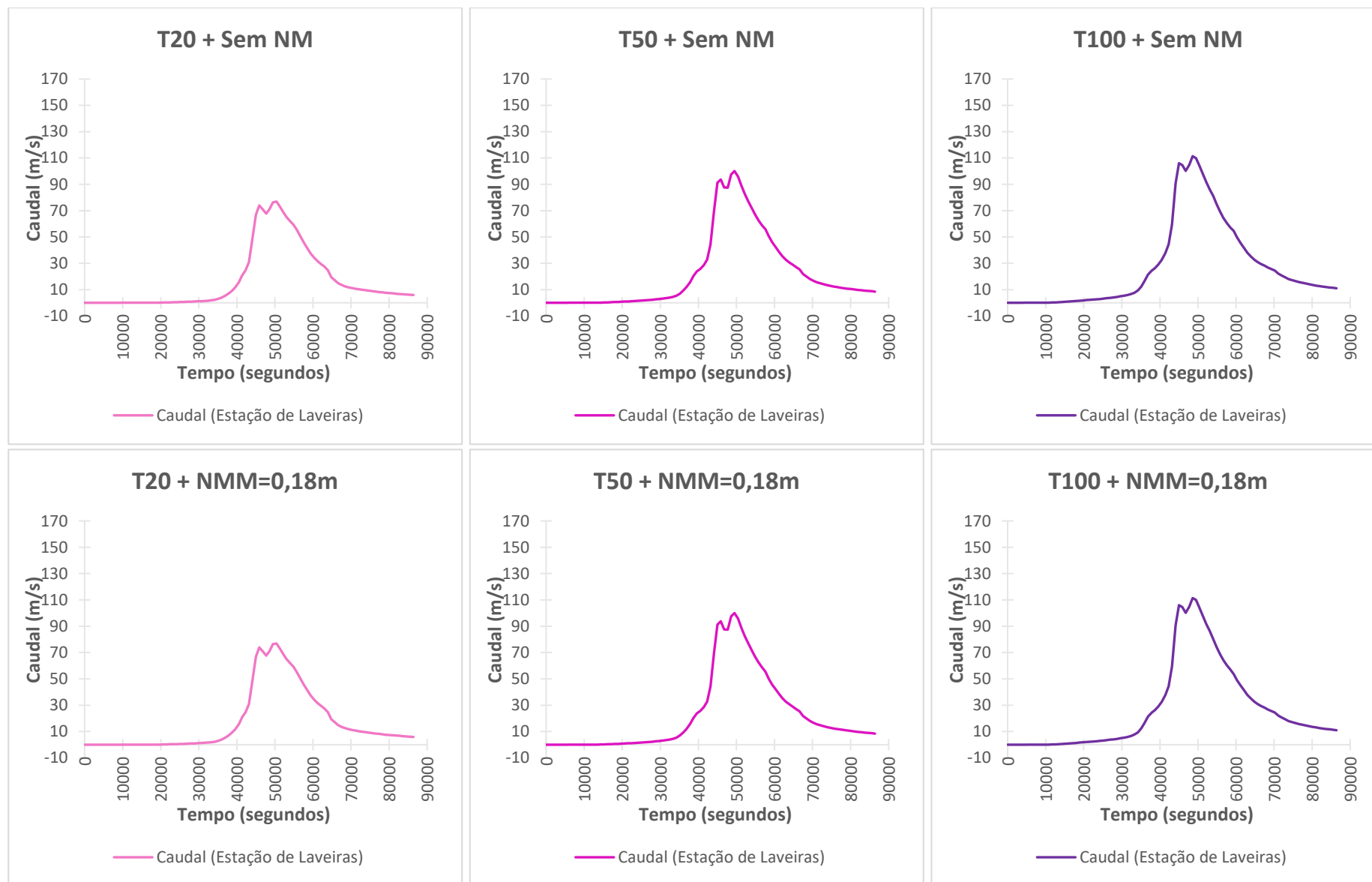
```

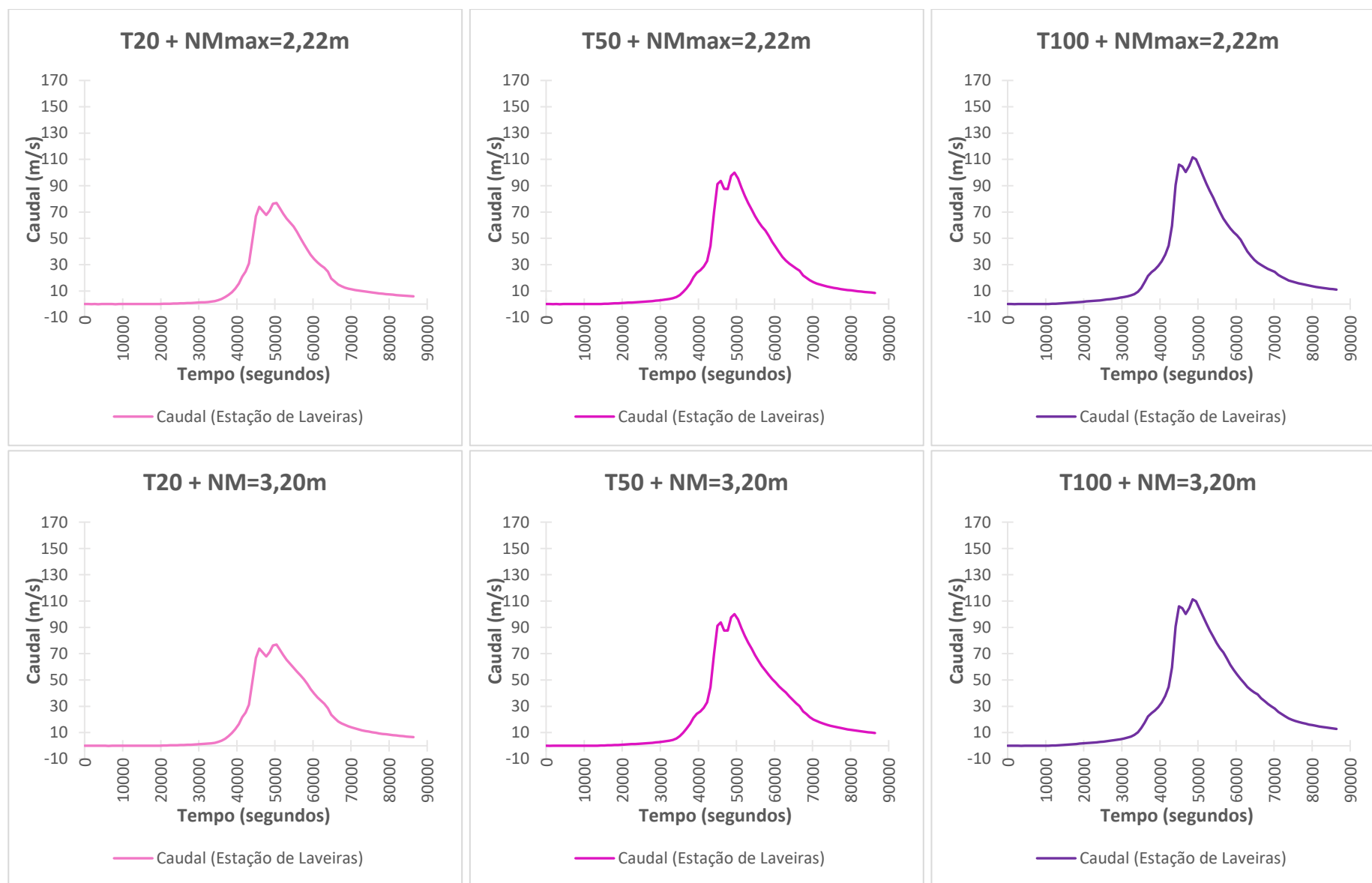
<begingrowthdatabase>
VEGETATION_ID                        : 94
NAME                                 : PINE
PLANT_TYPE                           : 7
BIOMASS_ENERGY_RATIO                : 15
OPTIMAL_HARVEST_INDEX               : 0.76
LAI_MAX                              : 5
GROWFRACTION_1                      : 0.15
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_1            : 0.7
GROWFRACTION_2                      : 0.25
OPTIMAL_LAIMAXFRACTION_2            : 0.99
GROWFRACTION_LAIDECLINE              : 0.1
CANOPY_HEIGHT_MAX                   : 10
ROOT_DEPTH_MAX                      : 3.5
OPTIMAL_TEMPERATURE                  : 30
BASE_TEMPERATURE                     : 0
YELD_NITROGENFRACTION               : 0.0015
YELD_PHOSPHORUSFRACTION             : 0.0003
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N1         : 0.006
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N2         : 0.002
OPTIMAL_NITROGENFRACTION_N3         : 0.0015
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P1       : 0.0007
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P2       : 0.0004
OPTIMAL_PHOSPHORUSFRACTION_P3       : 0.0003
MINIMUM_HARVEST_INDEX               : 0.6
RUE_DECLINE_RATE                     : 8
CO2_HIGH                            : 660
BIOMASS_ENERGY_RATIO_HIGH           : 16
LAI_MIN_DORMANCY                     : 0.75
BIOMASS_FRAC_REMOVED_DORMANCY       : 0.3
RADIATION_EXTINCTION_COEF           : 0.65
TREE_YEARSTOMATURITY                : 0
TREE_MAXIMUMBIOMASS                 : -99
EVERGREEN                           : 1
<endgrowthdatabase>

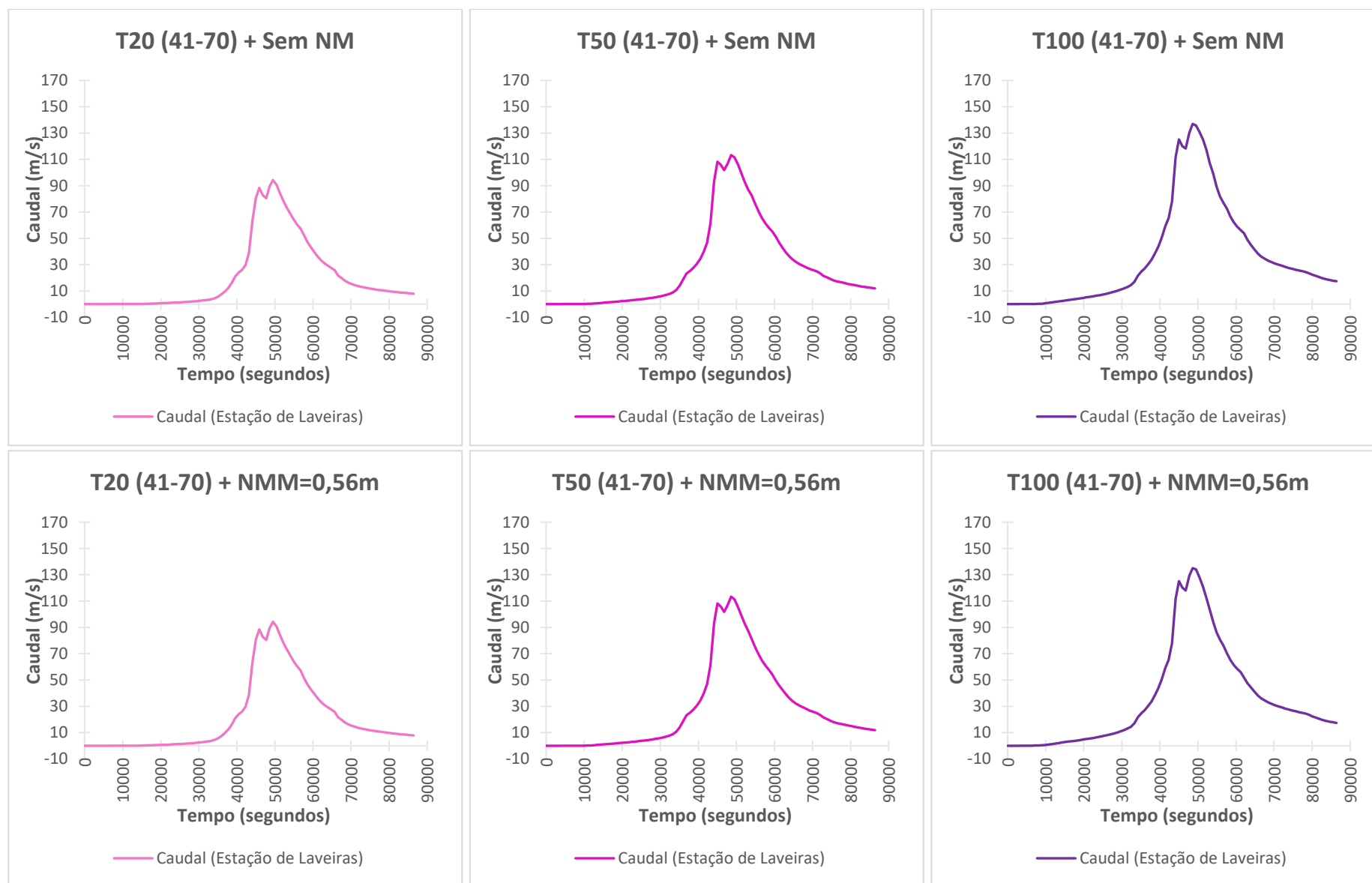
```

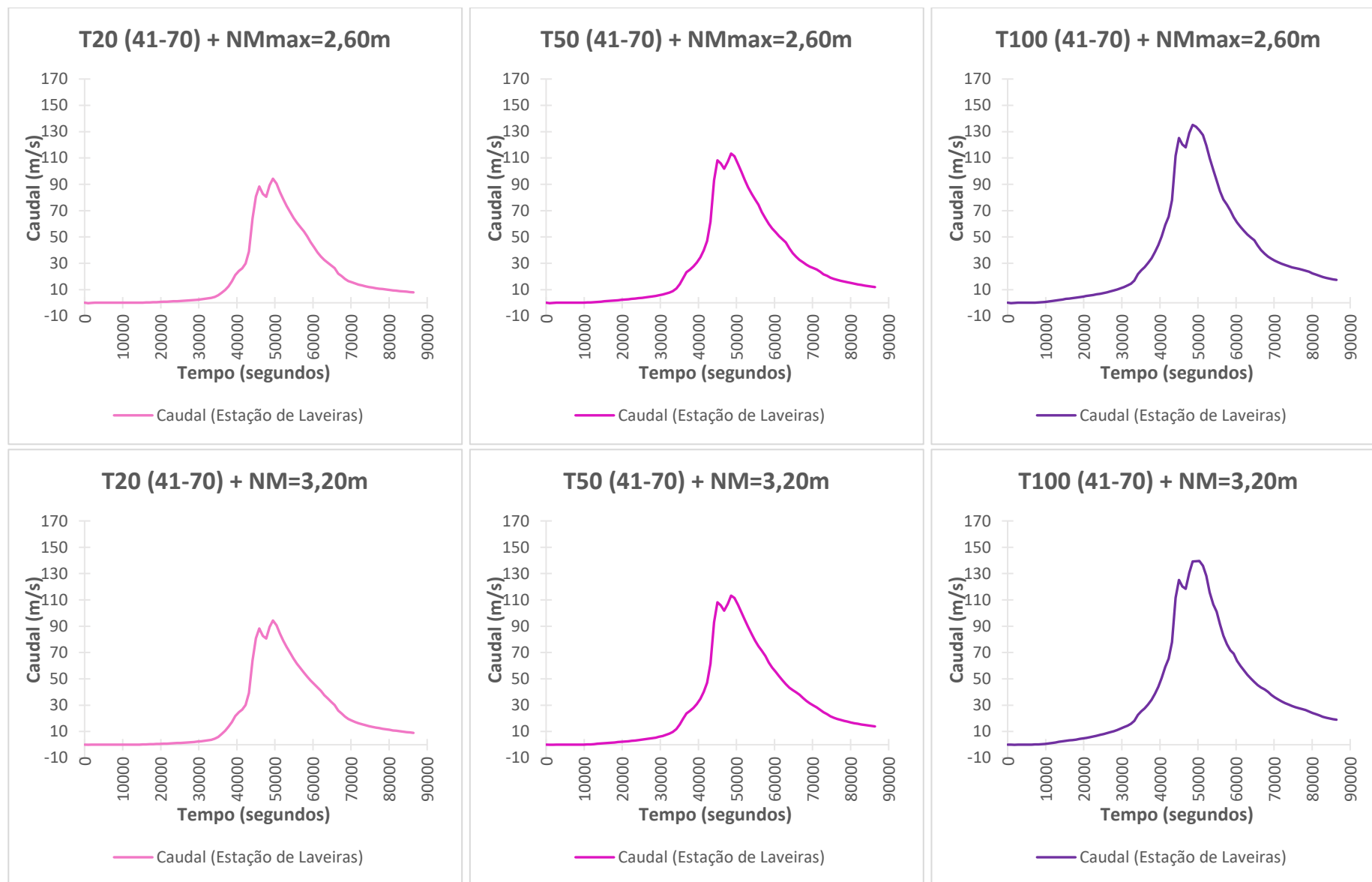
Anexo 3 – Caudais de ponta de cheia obtidos na modelação hidrológica

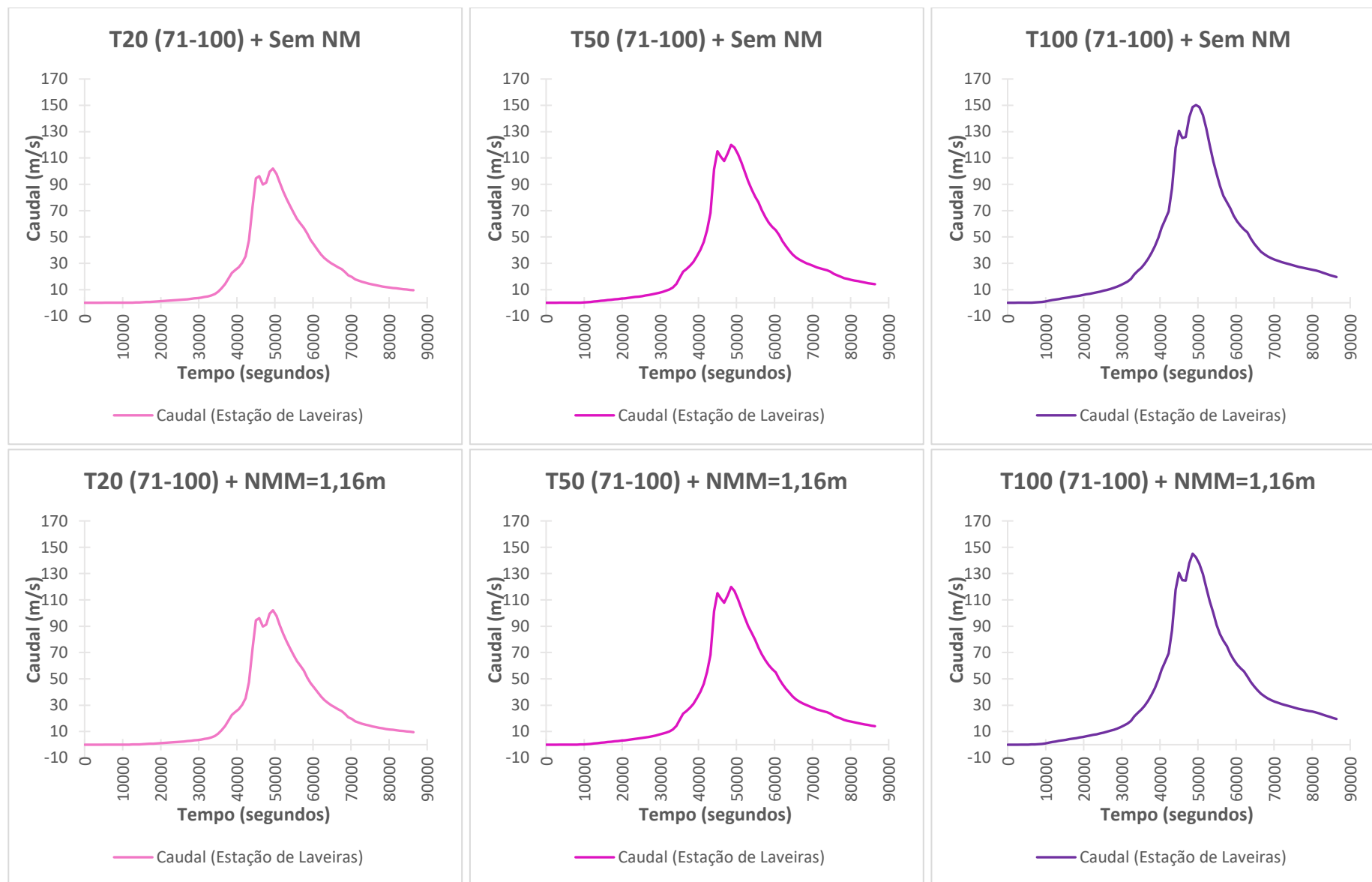
O presente anexo constitui os caudais afluentes à entrada do modelo hidráulico (Estação Hidrométrica de Laveiras), para os diferentes períodos de retorno (20, 50 e 100 anos), cenários de alterações climáticas (presente, futuro médio prazo e futuro longo prazo) e situações de forçamento oceanográfico (nulo, normal, tempestade e extremo).

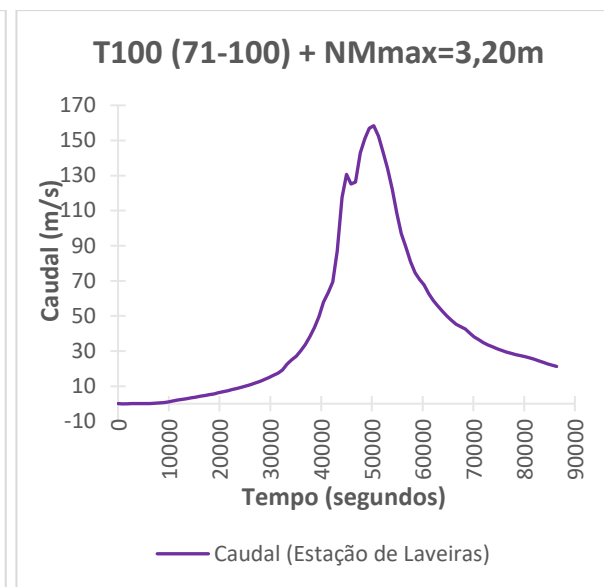
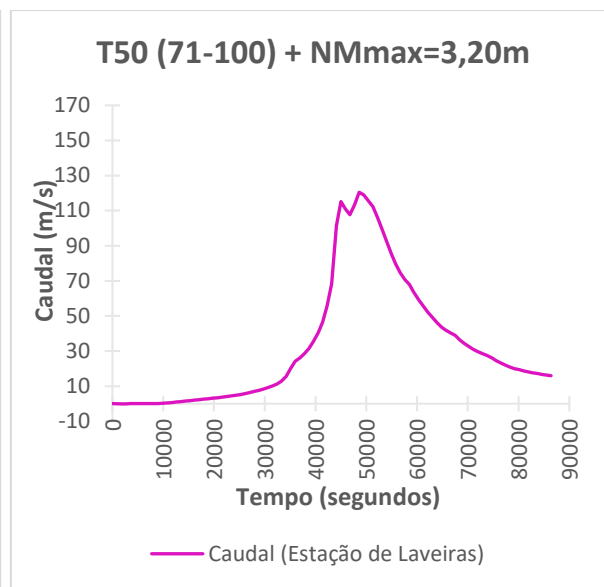
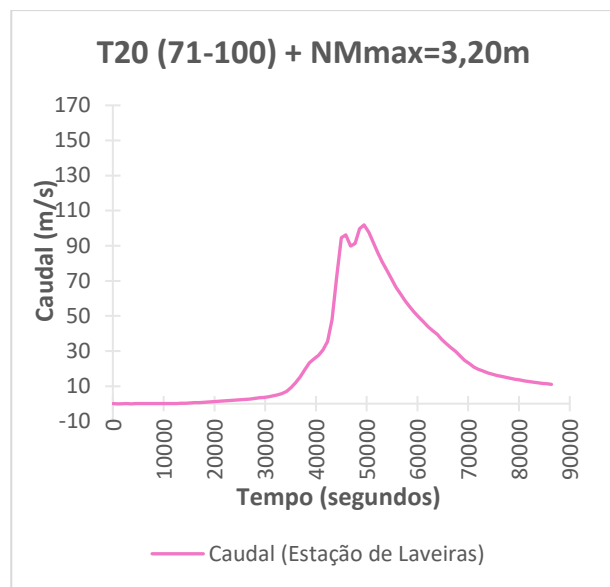












Anexo 4 – Áreas de observação

Mapas obtidos no âmbito da análise do contributo das precipitações extremas e/ou forçamento oceanográfico nas cheias e inundações, associados aos períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, para o cenário presente e futuro de médio e longo prazo, considerando a situação normal de forçamento oceanográfico (NMM), a situação de tempestade no mar ($NM_{máx}$), a situação extrema de forçamento oceanográfico (NM) e a situação de forçamento nulo (*Critical Depht*).

T20
Presente
Sem NM



T20
Médio prazo
(41-70)
Sem NM

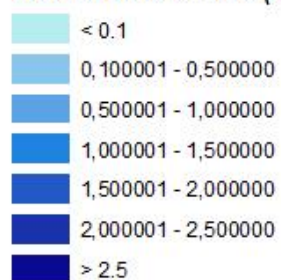


T20
Longo prazo
(71-100)
Sem NM



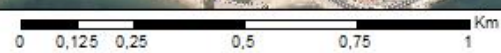
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T20
Presente
NMM=0.18m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

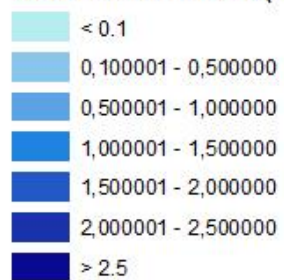


T20
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



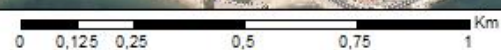
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T20
Presente
NMmax=2.22m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m

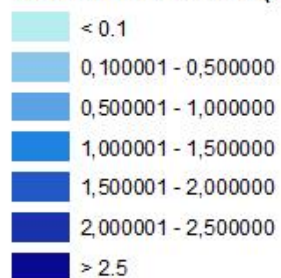


T20
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T20
Presente
NM=3.20m

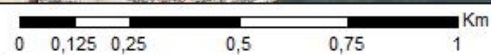
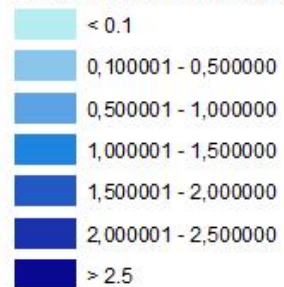


T20
Médio prazo
(41-70)
NM=3.20m



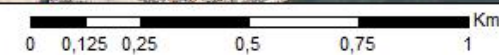
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T50
Presente
Sem NM



T50
Médio prazo
(41-70)
Sem NM

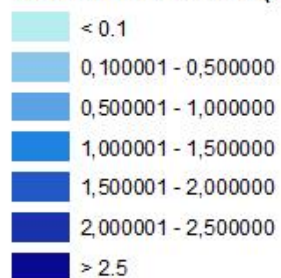


T50
Longo prazo
(71-100)
Sem NM



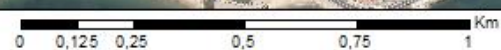
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T50
Presente
NMM=0.18m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

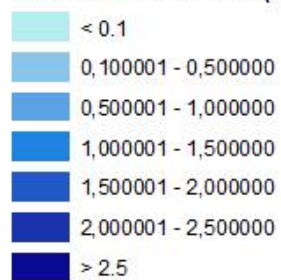


T50
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



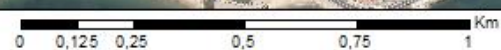
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T50
Presente
NMmax=2.22m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m

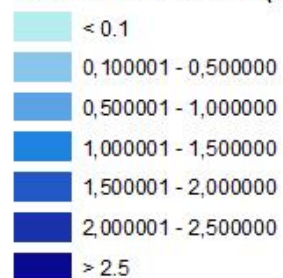


T50
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



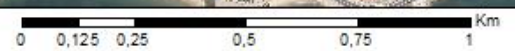
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T50
Presente
NM=3.20m

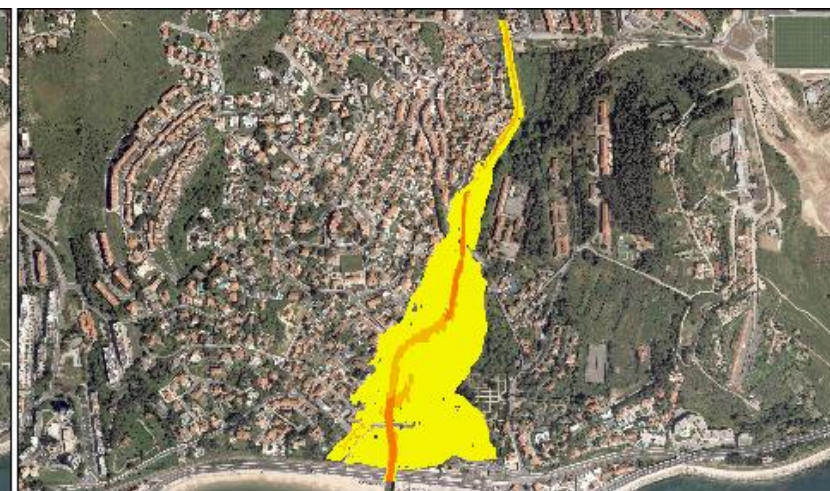
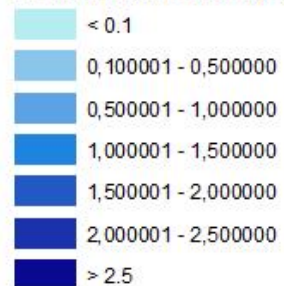


T50
Médio prazo
(41-70)
NM=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T100
Presente
Sem NM



T100
Médio prazo
(41-70)
Sem NM

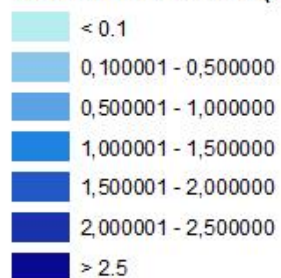


T100
Longo prazo
(71-100)
Sem NM



Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

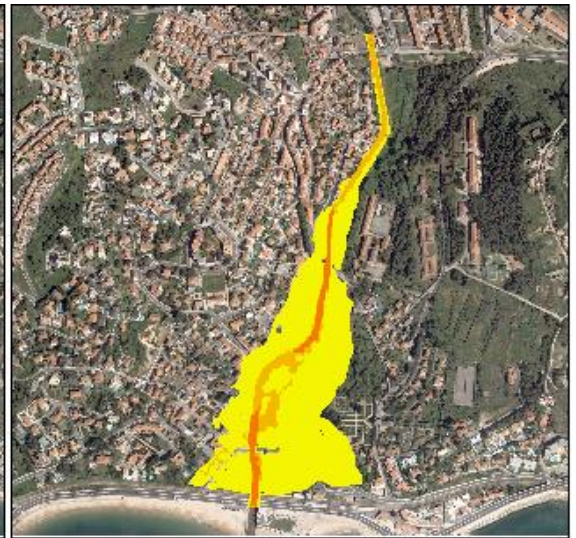
Perigosidade



0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente
NMM=0.18m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

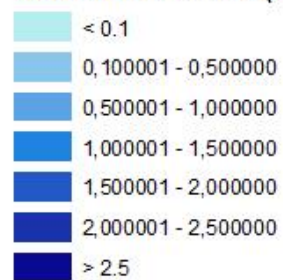


T100
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



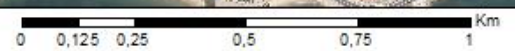
Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



T100
Presente
NMmax=2.22m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m

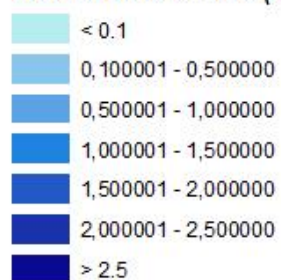


T100
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

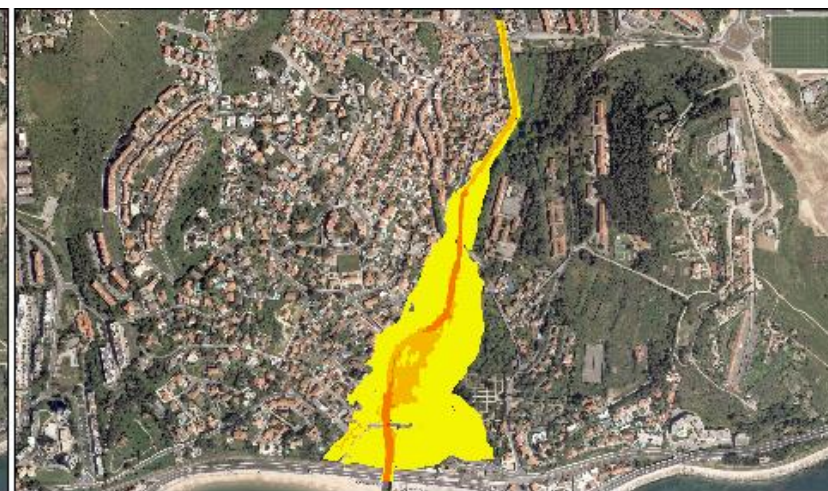
Perigosidade



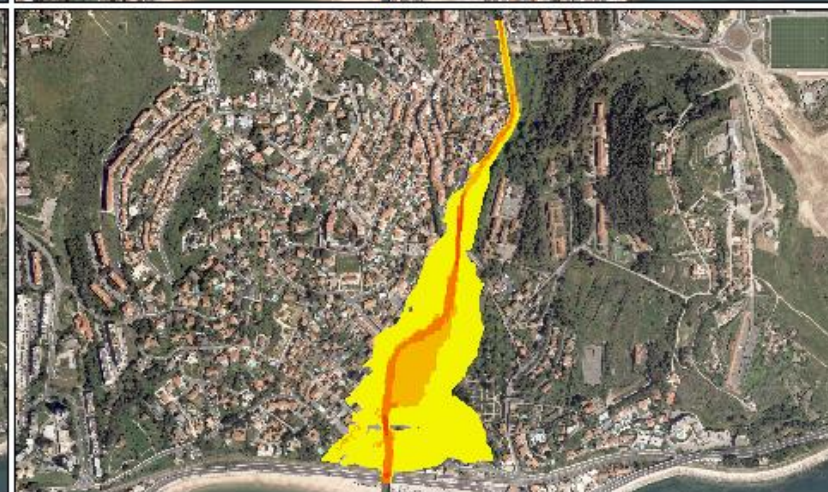
0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente
NM=3.20m

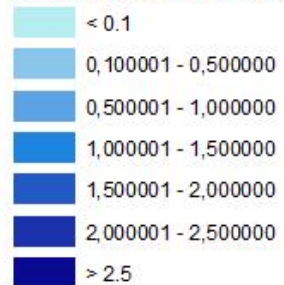


T100
Médio prazo
(41-70)
NM=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)



Legenda

Perigosidade



Anexo 5 – Resposta da variação do nível do mar na distribuição da profundidade máxima de inundação

De forma a quantificar a resposta da variação do nível do mar nas profundidades máximas das áreas de observação, apresenta-se a tabela A.1, que constitui as variações percentuais observadas nas 6 classes de valores definidas nas áreas de observação.

Tabela A.1 – Resposta da variação do nível do mar na distribuição da profundidade máxima de inundação: Variação percentual do número de células relativas a cada classe de valores. A sombreado vermelho estão as classes onde se registou uma diminuição no número de pixéis e a sombreado verde, as classes onde se verificou um aumento no número de pixéis.

Período de retorno	Forçamento oceanográfico	NM (m)	≤ 0,5]0,5; 1,0]]1,0; 1,5]]1,5; 2,0]]2,0; 2,5]	≥ 2,5
T20	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,12	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-5,59	-0,17	1,99	3,77	0,00	0,00
T20 (41-70)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,51	-0,17	0,54	0,14	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,40	-1,29	1,62	3,08	0,00	0,00
T20 (71-100)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-3,45	-1,68	3,47	1,67	0,00	0,00
T50	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,15	0,05	0,03	0,07	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,43	-1,63	2,74	2,33	0,00	0,00
T50 (41-70)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,36	-0,09	0,32	0,10	0,02	0,00
	Extremo	3,20	-3,45	-0,27	2,01	-0,20	1,92	0,00
T50 (71-100)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-3,79	1,07	0,39	0,19	2,14	0,00
T100	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,22	-0,05	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00
	Extremo	3,20	-3,28	-0,83	2,58	0,87	0,66	0,00
T100 (41-70)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	2,60	-0,32	-0,03	0,09	-0,15	0,43	0,00
	Extremo	3,20	-3,21	0,94	-0,54	1,31	1,51	0,00
T100 (71-100)	Nulo	CD	-	-	-	-	-	-
	Normal	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tempestade	3,20	-3,15	0,92	-1,17	2,67	0,56	0,17

Anexo 6 – Cartografia de áreas inundáveis na zona em estudo

Mapas relativos à profundidade máxima de inundação, velocidade do escoamento e perigosidade associados aos períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, para o cenário presente e futuro de médio e longo prazo, considerando a situação normal de forçamento oceanográfico (NMM) e situação de tempestade no mar ($NM_{máx}$).

T20
Presente
NMM=0.18m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

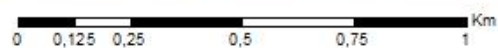
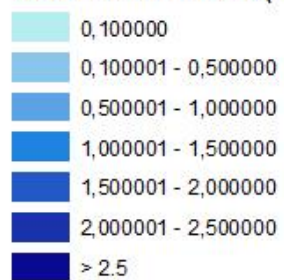


T20
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Profundidade máxima (m)



T20
Presente
NMM=0.18m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

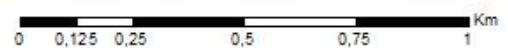
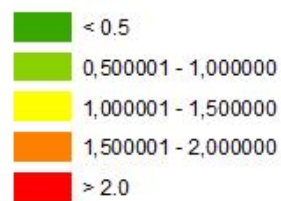


T20
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Velocidade do escoamento (m/s)



T20
Presente
NMM=0.18m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m



T20
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T20
Presente

NMmax=2.22m



T20
Médio prazo
(41-70)

NMmax=2.60m



T20
Longo prazo
(71-100)

NMmax=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)

	0,100000
	0,100001 - 0,500000
	0,500001 - 1,000000
	1,000001 - 1,500000
	1,500001 - 2,000000
	2,000001 - 2,500000
	> 2,5

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T20
Presente
NMmax=2.22m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m



T20
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Velocidade do escoamento (m/s)

- < 0.5
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 1,500000
- 1,500001 - 2,000000
- > 2.0

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T20
Presente
NMmax=2.22m



T20
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m



T20
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T50
Presente
NMM=0.18m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

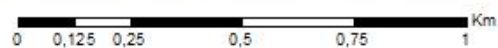
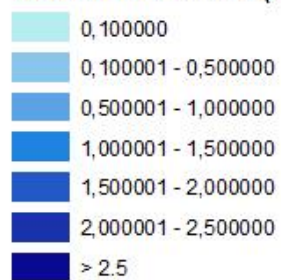


T50
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Profundidade máxima (m)



T50
Presente
NMM=0.18m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m



T50
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Velocidade do escoamento (m/s)

- < 0.5
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 1,500000
- 1,500001 - 2,000000
- > 2.0

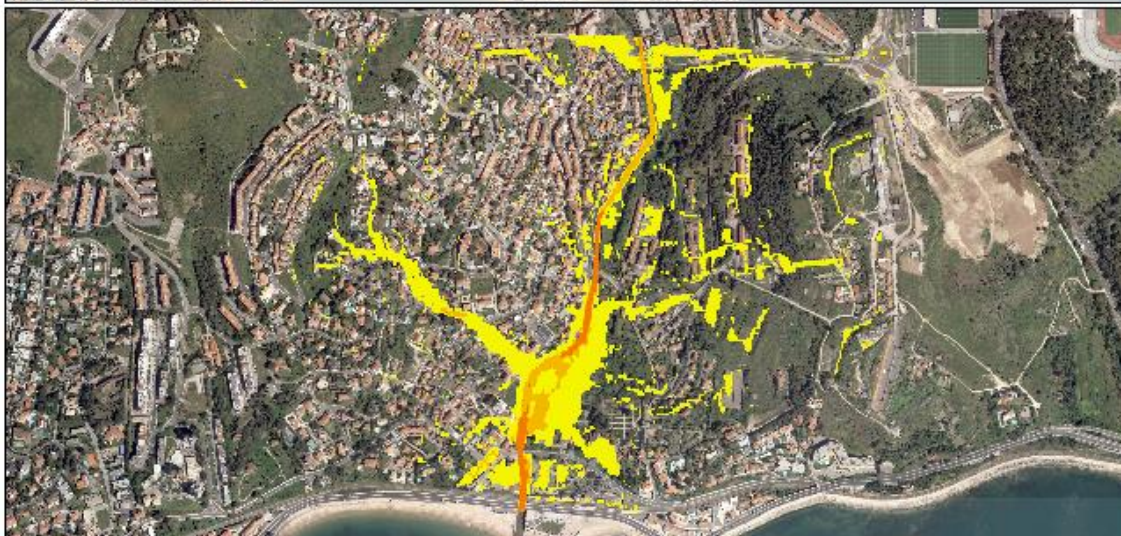
0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



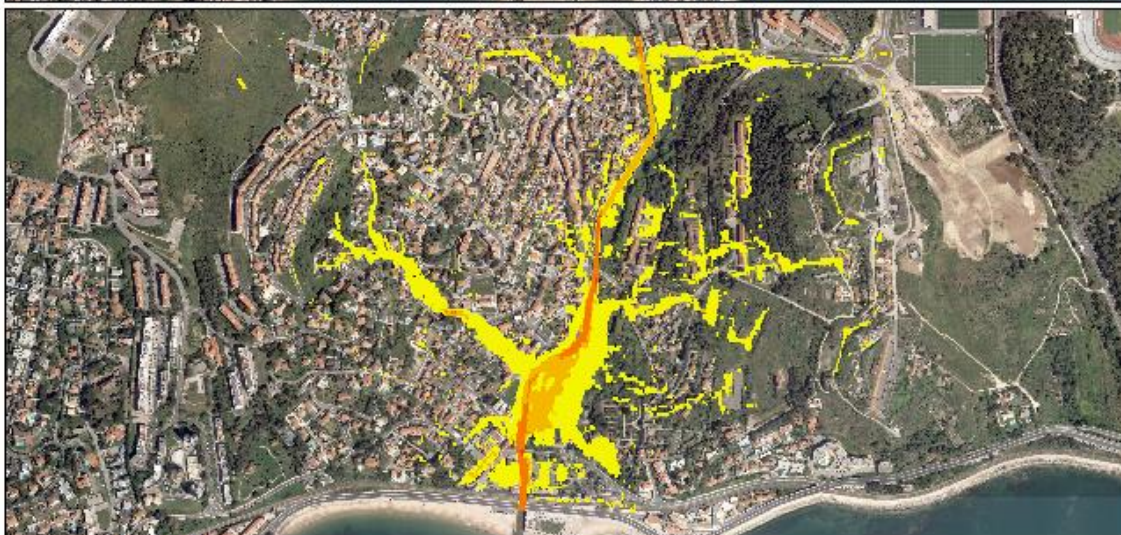
T50
Presente
NMM=0.18m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m



T50
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T50
Presente

NMmax=2.22m



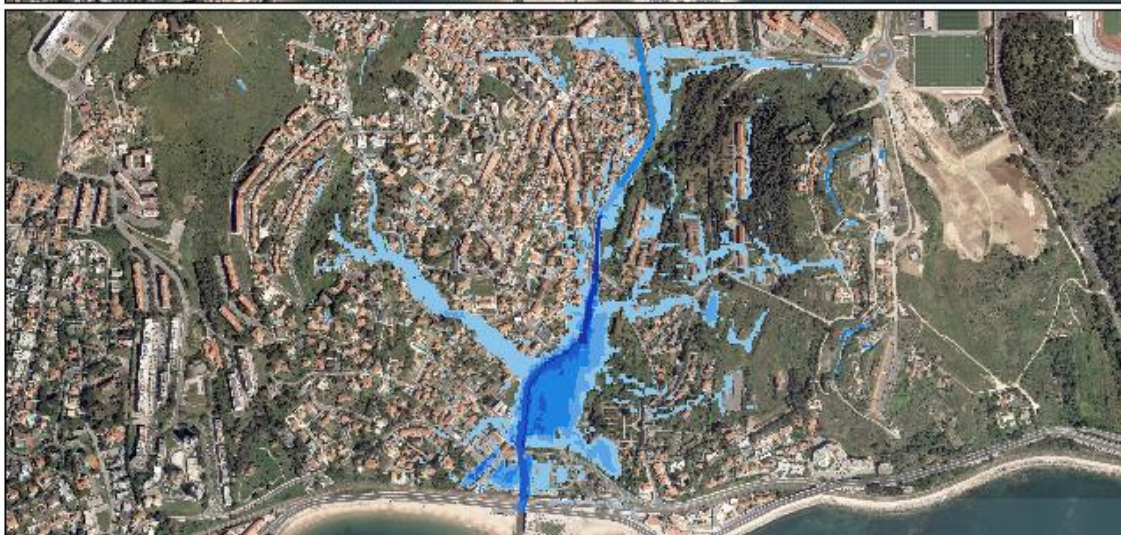
T50
Médio prazo
(41-70)

NMmax=2.60m



T50
Longo prazo
(71-100)

NMmax=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)

0,100000
0,100001 - 0,500000
0,500001 - 1,000000
1,000001 - 1,500000
1,500001 - 2,000000
2,000001 - 2,500000
> 2,5

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T50
Presente

NMmax=2.22m



T50
Médio prazo
(41-70)

NMmax=2.60m



T50
Longo prazo
(71-100)

NMmax=3.20m



Legenda

Velocidade do escoamento (m/s)

- < 0.5
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 1,500000
- 1,500001 - 2,000000
- > 2.0

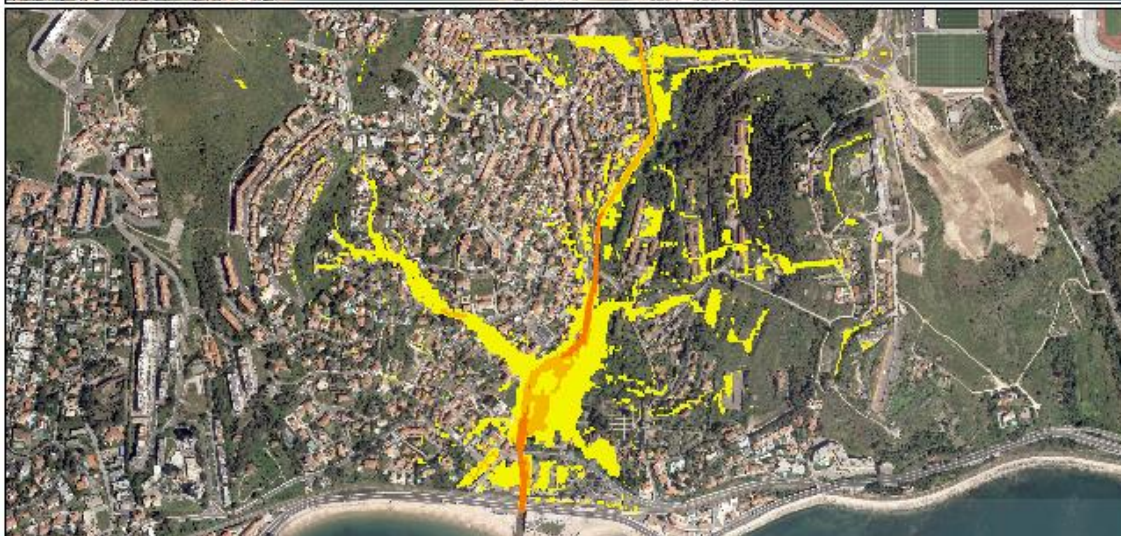
0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



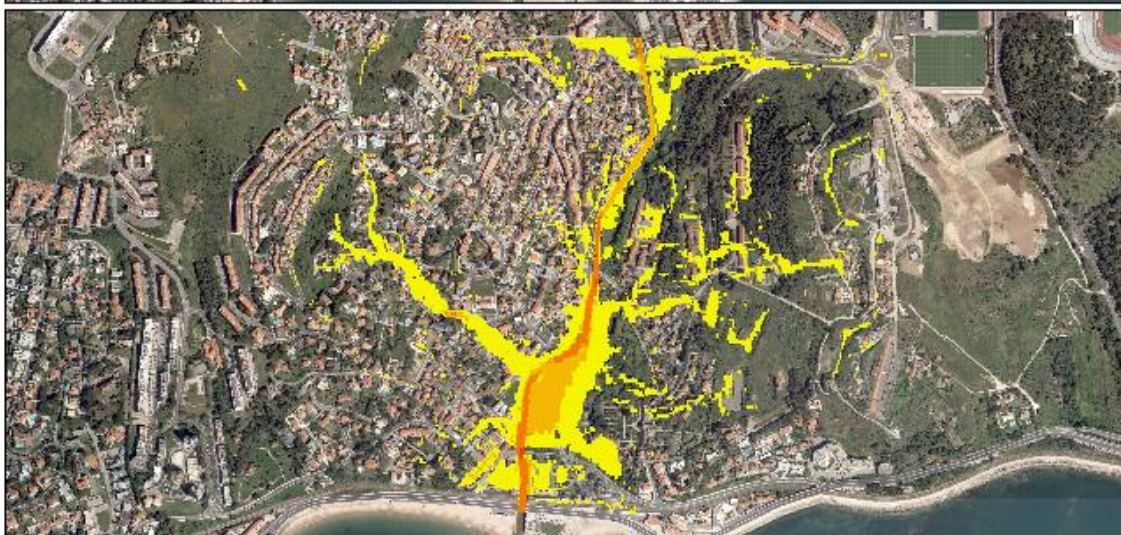
T50
Presente
NMmax=2.22m



T50
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m



T50
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente
NMM=0.18m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m

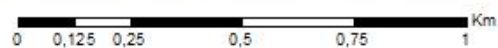
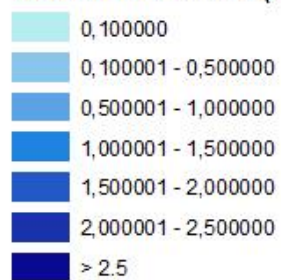


T100
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Profundidade máxima (m)



T100
Presente
NMM=0.18m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m



T100
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

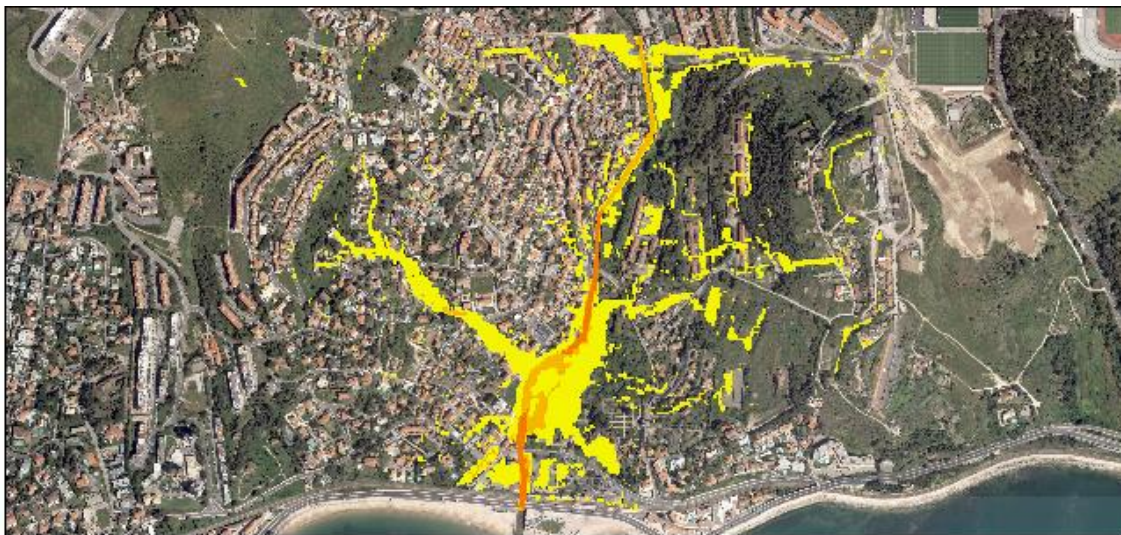
Velocidade do escoamento (m/s)

- < 0.5
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 1,500000
- 1,500001 - 2,000000
- > 2.0

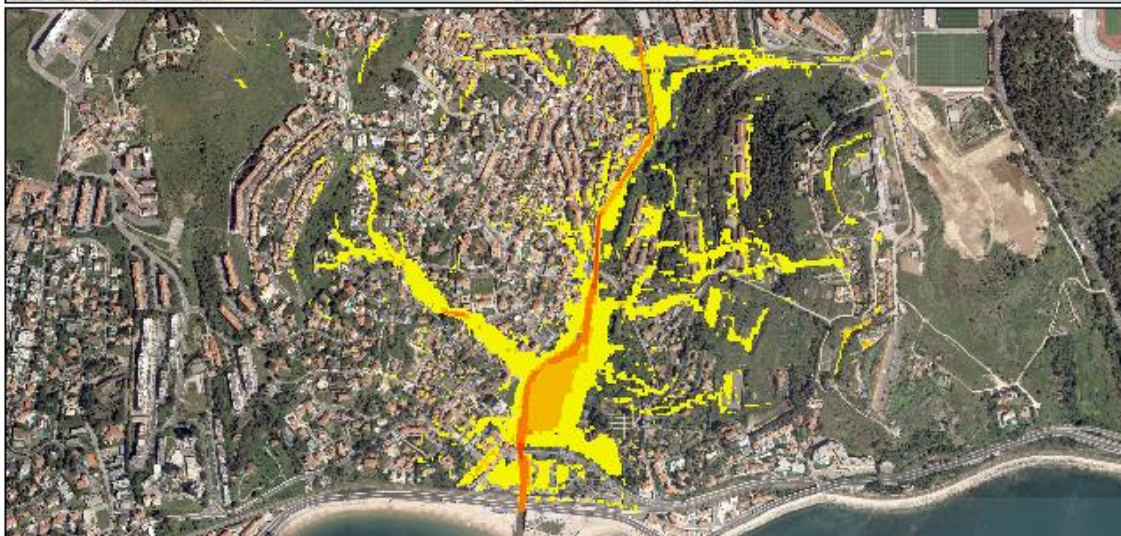
0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente
NMM=0.18m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMM=0.56m



T100
Longo prazo
(71-100)
NMM=1.16m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente

NMmax=2.22m



T100
Médio prazo
(41-70)

NMmax=2.60m



T100
Longo prazo
(71-100)

NMmax=3.20m



Legenda

Profundidade máxima (m)

0,100000
0,100001 - 0,500000
0,500001 - 1,000000
1,000001 - 1,500000
1,500001 - 2,000000
2,000001 - 2,500000
> 2,5

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



T100
Presente

NMmax=2.22m



T100
Médio prazo
(41-70)

NMmax=2.60m



T100
Longo prazo
(71-100)

NMmax=3.20m



Legenda

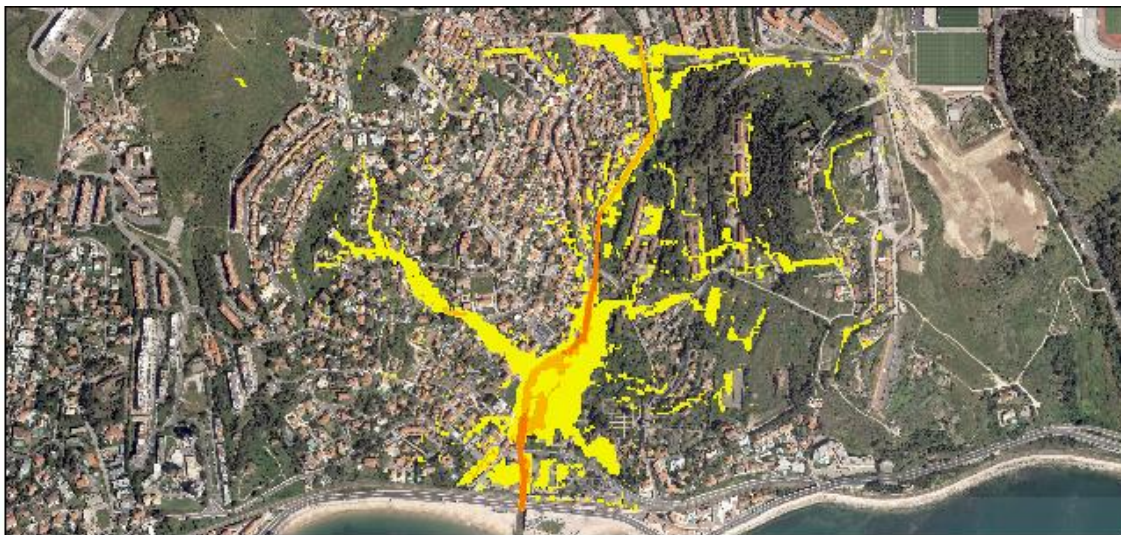
Velocidade do escoamento (m/s)

- < 0.5
- 0,500001 - 1,000000
- 1,000001 - 1,500000
- 1,500001 - 2,000000
- > 2.0

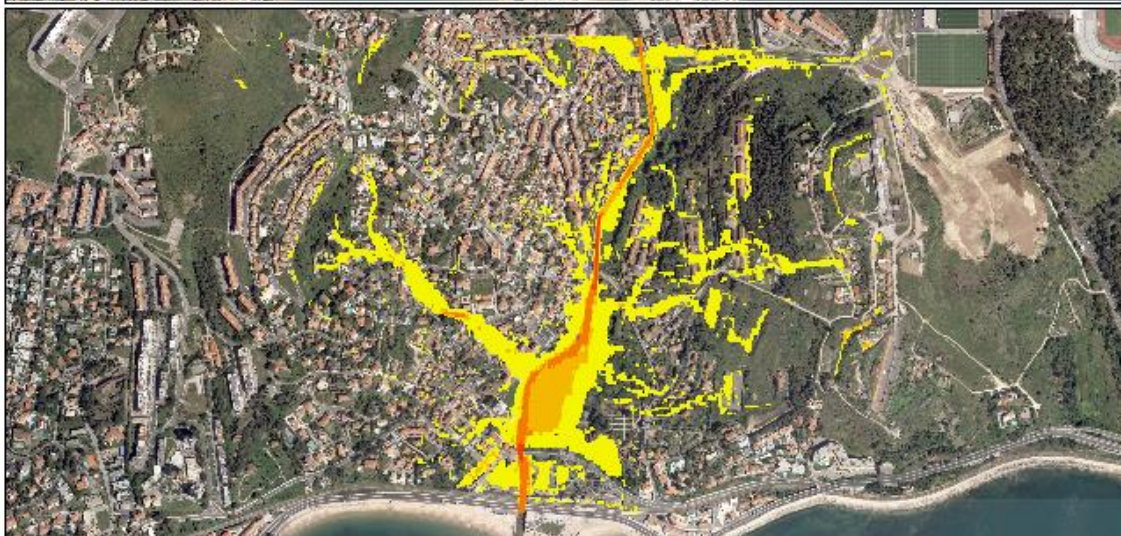
0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



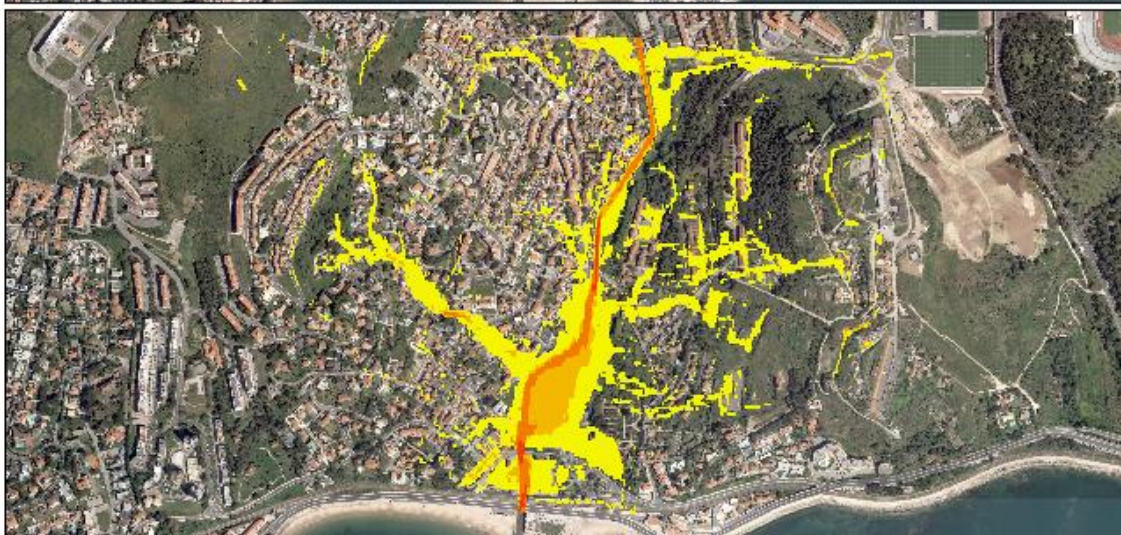
T100
Presente
NMmax=2.22m



T100
Médio prazo
(41-70)
NMmax=2.60m



T100
Longo prazo
(71-100)
NMmax=3.20m



Legenda

Perigosidade

- Inexistente
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

0 0,125 0,25 0,5 0,75 1 Km



“Water is the driving force of all nature.”
[Leonardo Da Vinci]